

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

### Главный редактор:

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

### Заместители главного редактора:

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

**Шебе Хендрик** – доктор естественных наук, главный эксперт по надежности, эксплуатационной готовности, 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, Россия)

### 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, Россия)

### Сопредседатель редакционного совета:

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

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

## 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 11.03.2025

Объем 92, Тираж 500 экз, Заказ № 19620  
Формат 60х90/8, Бумага глянец

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

Статьи рецензируются.  
Статьи опубликованы в авторской редакции.

ЖУРНАЛ 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 K2 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

От редколлегии ..... 3

Вопросы автоматизации  
и управления процессами на транспорте

**Шебе Х., Шубинский И.Б., Розенберг Е.Н.** Различные подходы к автономному вождению для железных дорог ..... 4

**Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З.,  
Абдуллаева С.А.** Совершенствование методов управления эксплуатационной надёжностью распределённых объектов энергетики ..... 11

Системный анализ в задачах надёжности  
и безопасности

**Собин А.Е.** Разработка алгоритма оптимизации календарно-сетевого планирования строительства метро с учетом ограниченных ресурсов на основе теории графов ..... 19

**Наумов И.В., Соболева А.Э.** О превентивной оценке возникновения отказов и причинах их возникновения (на примере филиала ПАО «Россети Волги» – «Ульяновские распределительные сети») ..... 28

Дискуссия по проблемам надёжности  
и безопасности

**Нетес В.А.** Типичные недостатки в статьях по надёжности ..... 40

Применение искусственного интеллекта  
в задачах надёжности и безопасности

**Бочкова А.А.** Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем ..... 46

Функциональная надёжность  
систем управления

**Климов С.М., Сосновский Ю.В., Чачиев Д.Р.** Методика оценки функциональной надёжности компонент программно-аппаратной встраиваемой микропроцессорной системы управления ..... 58

Защита информации

**Грачев Я.Л., Сидоренко В.Г.** Использование качественных характеристик изображения для комплексного стегоанализа ..... 67

**6-я Евразийская конференция «Методология и практика минимизации природных и техногенных рисков изменения климата» Eurasian RISK-2024** ..... 75

**Памяти Ю.К. Беляева** ..... 79

**Редакция рекомендует** ..... 80

**Гнеденко – Форум** ..... 83



#### **Уважаемые коллеги!**

Наступил 2025 год. Ему сопутствуют надежды на завершение специальной военной операции на Украине на основе достижения поставленных задач. Суверенитет нашей Родины во многом зависит от развития науки и технологий. Это особенно важно в условиях беспрецедентного санкционного давления. Широко применяемые процедуры импортозамещения не в полной мере гарантируют надежность и безопасность эксплуатируемых изделий. На основе научно-технического прогресса экономики нашей страны создаются возможности для собственных разработок надежной и безопасной продукции и услуг.

Проблемы надежности находятся в центре внимания всех отраслей экономики страны. Они основательно проработаны применительно к надежности продукции. При этом требуют более тщательной проработки задачи предиктивного анализа для достоверного и точного прогнозирования событий отказов и восстановлений технических средств, распределения требований к надежности сложных систем и их составных элементов, задачи рационального комплексирования надежности и диагностики и парирования на этой основе скрытых отказов, задачи адаптации систем к отказам, оптимизация надежности по стоимости и т.д. В отношении надежности услуг ситуация представляется гораздо скромнее. На ранней стадии развития находятся вопросы надежности выполнения действий, про-

цессов, функций техническими средствами, программно-аппаратными комплексами, а также человеко-машинными системами. Требуют пристального внимания специалистов задачи анализа сбоев цифровой техники на результаты выполнения функций системами.

Публикация результатов исследований по затронутым выше проблемам надежности приветствуется редколлегией журнала.

Проблема безопасности продукции и услуг всегда находилась в центре внимания как разработчиков, так и эксплуатирующих организаций. Технологии функциональной и информационной безопасности, в особенности их сочетания, являются предметом пристального внимания широкого круга специалистов вследствие большой практической значимости. Уровень их развития оказывает решающее влияние на состояние безопасности критической информационной инфраструктуры (КИИ) различных отраслей экономики страны. Поэтому оригинальные научные или практические результаты в данной предметной области представляют для редколлегии журнала несомненный интерес.

Управление надежностью и безопасностью систем возможно на основе оценки рисков. Это направление особенно эффективно развивается в последние годы. Теория рисков – мощный инструмент для решения многих прикладных задач. Большой интерес для журнала «Надежность» представляют оригинальные работы авторов в области оценивания технических, технологических и техногенных рисков.

Перечисленные выше предметные области напрямую связаны с созданием современных и перспективных транспортных систем. Журнал «Надежность» отражает, в первую очередь, интересы железнодорожного транспорта. В связи с этим проблемы технического зрения, автоведения, искусственного интеллекта представляют повышенный интерес, а результаты исследований по ним очень актуальны для публикации в журнале.

Уважаемые авторы! Редколлегия журнала приветствует в 2025 году ваши статьи, соответствующие заявленным в журнале разделам и специальностям ВАК. Желаем здоровья, и больших творческих достижений!

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



# Различные подходы к автономному вождению для железных дорог

## Various approaches to autonomous driving in railways

Шебе Х.<sup>1</sup>, Шубинский И.Б.<sup>2\*</sup>, Розенберг Е.Н.<sup>2</sup>  
Schäbe H.<sup>1</sup>, Shubinsky I.B.<sup>2\*</sup>, Rozenberg E.N.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> TÜV Rheinland InterTraffic, Кёльн, Германия

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

<sup>1</sup> TÜV Rheinland InterTraffic, Cologne, Germany

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

\*igor-shubinsky@yandex.ru



Шебе Х.



Шубинский И.Б.



Розенберг Е.Н.

**Резюме.** В данной статье мы анализируем различные технические решения для автономного вождения. В зависимости от роли автономной системы для нее могут потребоваться различные уровни полноты безопасности. Мы рассматриваем три основные архитектуры. Первая – это просто система поддержки, не требующая уровня полноты, а только базовую полноту. Вторая – простая замена машиниста один к одному, что соответствует уровню SIL 1, вплоть до SIL 2. Третья архитектура – интеграция функций АТО в систему защиты безопасного поезда, что соответствует требованиям SIL 4.

**Abstract.** In this paper, we analyse various technical solutions for autonomous driving. Depending on the role of an autonomous system, different safety integrity levels may be required. We examine the three primary architectures. The first one is simply a support system that only requires a basic integrity, rather than a level. The second one is a simple replacement of the driver, which corresponds to SIL 1 up to SIL 2. The third architecture is an integration of ATO into a safe train protection system, which corresponds to SIL 4.

**Ключевые слова:** Функциональная безопасность, автоматическое управление поездом, архитектура безопасности, требования безопасности

**Keywords:** functional safety, autonomous train driving, safety architecture, safety requirements

**Для цитирования:** Шебе Х., Шубинский И.Б., Розенберг Е.Н. Различные подходы к автономному вождению для железных дорог // Надежность. 2025. №1. С. 4-10. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-1-4-10>

**For citation:** Schäbe H., Shubinsky I.B., Rozenberg E.N. Various approaches to autonomous driving in railways. Dependability 2025;1:4-10. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-1-4-10>

**Поступила:** 15.11.2024 / **После доработки:** 10.01.2025 / **К печати:** 05.03.2025

**Received on:** 15.11.2024 / **Revised on:** 10.01.2025 / **For printing:** 05.03.2025

## Введение

В данной статье мы анализируем различные технические решения для автономного вождения. В зависимости от роли автономной системы для нее могут потребоваться различные уровни полноты безопасности.

За последние 20 лет в железнодорожном транспорте можно выделить две основные тенденции. С одной стороны, были разработаны системы метро без машинистов. Благодаря четко определенной среде автоматизировать систему метрополитена относительно просто. Путь обычно отделен от пассажиров и нарушителей, поскольку метро проходит в тоннелях, по наземному рельсовому пути, и на станциях используются платформенные перегородки, а система метрополитена защищена системой обнаружения вторжений.

С другой стороны, и на железных дорогах существует большая заинтересованность хотя бы в частичной автоматизации. В последние годы передвижение на железных дорогах базировалась в основном на машинисте, который по-прежнему необходим в соответствии с законодательством большинства стран.

Для автоматизации используются следующие степени автоматизации [1]:

- GoA0 – операции в зоне прямой видимости;
- GoA1 – неавтоматизированное движение поездов;
- GoA2 – полуавтоматическое управление поездами;
- GoA3 – эксплуатация поездов без машиниста (DTO);
- GoA4 – беспилотное движение поездов (БДП).

Многие системы АТО представляют собой систему GoA2, в которой поезда движутся от станции к станции в автоматическом режиме, но в кабине еще находится



машинист. Машинист отвечает за закрытие дверей, обнаружение препятствий на пути перед поездом и действия в аварийных ситуациях

В качестве первого шага были проведены исследования, направленные на помощь машинисту в его работе, например, для экономии электрической энергии или топлива путем оптимизации разгона и торможения. При этом машинист по-прежнему полностью отвечает за безопасность. Следовательно, эта функция не является функцией безопасности.

Однако в дальнейших исследованиях [2, 3] ведутся поиски возможностей прямой замены машиниста поезда. Это означает, что машинист в поезде больше не присутствует, а управление поездом будет осуществляться автоматически.

В новой версии TSI CCS [4] тоже упоминается АТО. В разделе 2 мы исследуем возможность простой замены машиниста поезда технической системой один к одному. Если функции машиниста заменяются техническими системами, то ситуация усложняется. В разделе 2 мы также описываем выведение важных требований к безопасности. Третий раздел посвящен интегрированным системам, в которых функции машиниста интегрированы в систему автоматической защиты поезда.

## 1. Система помощи машиниста

В качестве первого шага для локомотивов были разработаны системы поддержки в чистом виде. Это было сделано под влиянием систем поддержки для дорожных транспортных средств, список которых может быть очень длинным, некоторые примеры см. в [5]:

- адаптивное управление расстояний и скоростью (ACC);
- адаптивное рулевое управление (активное рулевое управление);
- адаптивное шасси;
- адаптивный дальний свет (безбликовый дальний свет);
- адаптивные поворотные огни;
- вспомогательная система движения прицепа задним ходом / Trailer Assist;
- антиблокировочная система тормозов (ABS);
- предупреждение о движении задним ходом;
- вспомогательная система по выходу;
- автоматическое оповещение об аварии (eCall);
- помощь в зоне строительства;
- вспомогательная система старта на подъеме (Hill Holder);
- ассистент торможения (ассистент экстренного торможения);
- динамическая реакция рулевого управления (DSTC);
- ESP (электронная система стабилизации);
- обнаружение транспортных средств;
- обнаружение пешеходов;
- вспомогательная система ограничения скорости (распознавание дорожных знаков);

- система предупреждения задних столкновений;
- интеллектуальная система помощи при торможении / Intelligent Brake Assist (IBA);
- предупреждение о перекрестном движении;
- ассистент по торможению на поворотах;
- обнаружение источника света;
- вспомогательная система левого поворота;
- вспомогательная система маневренного тормоза;
- обнаружение усталости;
- помощник ночного видения;
- помощник по парковке и гаражам (помощник по парковке/выезду);
- голосовое управление;
- предупреждение о сходе с полосы движения;
- помощник при дорожных заторах;
- круиз-контроль;
- вспомогательная система контроля слепых зон (ассистент смены полосы движения);
- антипробуксовочная система.

Многие из них не нужны для железных дорог, поскольку поезд движется по четко определенному пути (рельсам) и защищен от столкновения и превышения скорости автоматической системой защиты поезда.

Тем не менее, некоторые системы помощи уже разработаны, см., например, [2]:

- позиционирование поездов;
- кривая торможения и разгона (небезопасная);
- ограничения скорости (небезопасные);
- АТО (automatic train operation) в комбинации с ETCS; расписание.

Все эти системы в классических АТО обычно не имеют уровня полноты безопасности.

Кроме того, при рассмотрении АТО для автоматических систем метрополитена существует четкое разделение на АТО (небезопасные) и АТП (безопасные), см., например, [6].

## 2. Прямая замена машиниста

Следующим шагом в развитии систем АТО является замена машиниста, т.е. установка на локомотив технических систем, которые возьмут на себя функции машиниста без изменения самого локомотива. Первым шагом в этом направлении должно стать определение требований безопасности, главным образом, допустимой интенсивности отказов соответствующих функций. Данный раздел в основном посвящен исследовательскому проекту «Критерии приемлемости рисков для автоматизированного вождения на железной дороге», который был выполнен по заказу Немецкого центра исследований железнодорожного транспорта, см. итоговый отчет [7] и статью [8]. В рамках этого проекта разработаны критерии приемлемости риска для систем АТО на железной дороге.

В частности, большое значение имеют три вопроса:

- 1) каков уровень безопасности текущей системы с машинистом;

- 2) каковы требования безопасности к техническим системам, заменяющим машиниста;
- 3) как эти требования могут быть сопоставлены и объединены.

Решающим фактором здесь является то, что система АТО должна обеспечивать как минимум тот же уровень безопасности, что и машинист.

Для выведения требований к безопасности используются два подхода. Первый из них ориентирован на анализ вероятности человеческой ошибки и требует, чтобы техническая система, заменяющая машиниста, была как минимум не хуже машиниста, а второй использует стандарт для выведения требований к функциям, заменяющим машиниста. В следующих двух подразделах обсуждаются результаты для функции обнаружения препятствий. Более подробная информация приведена, например, в [9].

2.1. Применение методов Hinzen и RARA для обнаружения препятствий на открытом пути

Для определения вероятности человеческой ошибки используются два метода: Hinzen и RARA, подробности и определение подходов см. в [9].

Оценка действий машинистов поездов с помощью RARA и Hinzen была определена междисциплинарной командой Берлинского технического университета в ходе модулируемого семинара. В табл. 1 оценивается действие «Обращение с препятствиями на открытом пути, если они явно воспринимаются как препятствие». Сюда относятся, например, встречные рельсовые транспортные средства на однопутных линиях. Результаты для обоих методов имеют схожий порядок величины, однако учет усталости, вызванной сменной работой, приводит к большему значению полученному с помощью RARA.

Более подробная информация приведена в [9].

2.2. Сравнение с допустимым уровнем опасных отказов технических систем

Не вдаваясь в подробности, параллельно с учетом человеческих ошибок была применена процедура определения TFFR (Tolerable Functional Failure Rate) – допустимая частота функциональных отказов – в соответствии с DIN V VDE 0831-103 [10]. Для типичных функций, таких как обнаружение препятствий, было получено значение  $9 \cdot 10^{-7}$  1/ч.

В основе человеческой ошибки и отказа технических систем лежат разные процессы. Сравнить эти величины можно следующим образом:

- а) перевод вероятности человеческой ошибки на одно действие в интенсивность отказов в час, или
- б) получение вероятности ошибки из интенсивности отказов.

Оба направления рассмотрения эквивалентны, хотя и принципиально различны. Если в а) функциональный отказ может быть устранен только ремонтом, то в б) сбои (самоустраняющиеся отказы). В а) интенсивность отказов определяется ожидаемым числом событий в единицу времени в интервале между двумя контрольными испытаниями. В случае б), напротив, применение методов по RARA и Hinzen происходит в сочетании с оценкой интенсивности требований.

Стандарты железнодорожной техники не знают PFD, т.е. средней вероятности отказа по требованию. Однако можно показать связь между PFD и TFFR, см., например, [16]

$$TFFR = PFD \cdot \lambda,$$

где  $\lambda$  – интенсивность требований.

Теперь в качестве интенсивности требований выбирается максимальная, которая получается из интенсивности требований машинисту поезда, а также из

Табл. 1. Результаты адаптированных методик по RARA и по Hinzen для действия «Обращение с препятствиями на открытой трассе, если они четко воспринимаются как препятствия»

|                       | Выбор                                  | Комментарий                                                                                                                             |
|-----------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Адаптированный Хинцен | Поведенческий уровень: Навыки          | Для препятствия, которое четко распознается как соответствующее, реакция экстренного торможения предполагается сенсорно-моторной        |
|                       | Повышение уровня стресса               | –                                                                                                                                       |
|                       | Благоприятные условия окружающей среды | –                                                                                                                                       |
|                       | $1 \times 10^{-3}$                     | Результат вероятности человеческой ошибки на действие                                                                                   |
| RARA адаптированная   | Тип задачи R3                          | Для препятствия, которое четко идентифицируется как соответствующее, простой реакцией является начало экстренного торможения.           |
|                       | Фактор влияния T2                      | Экстренное торможение должно быть выполнено как можно быстрее, чтобы предотвратить аварию или ограничить размер ущерба                  |
|                       | Фактор влияния T6                      | В случае небольших препятствий повреждения локомотива при столкновении незначительны, поэтому столкновение может остаться незамеченным. |
|                       | Фактор влияния P2                      | Предполагается, что определенная степень утомления, связанная с посменной работой, присуща железнодорожной системе.                     |
|                       | $8,6 \times 10^{-3}$                   | Верхняя граница интервала Вероятность человеческой ошибки на одно действие                                                              |
|                       | $2,9 \times 10^{-3}$                   | Нижняя граница интервала Вероятность человеческой ошибки на одно действие                                                               |

интенсивности требований, соответствующей интервалу контрольных проверок.

Предполагается, что техническая система ежегодно подвергается тщательной проверке (контрольная проверка), в ходе которой выявляются все «спящие» неисправности. С другой стороны, требование к машинисту поезда воспринять и впоследствии отреагировать на отклонение может предъявляться реже, чем раз в год. В частности, учитывая большое количество функций, все требования к машинисту распределены между многими функциями, поэтому интенсивность требования каждой функции будет соответственно небольшой. Тем не менее, требование на реакцию машиниста и ежегодная контрольная проверка действуют совместно, так что спрос возникает не реже одного раза в год. Это оправдывает максимальное значение.

Таким образом, интенсивность требований определяется как значение  $1/8760$  1/ч. Это значение может быть подтверждено следующим образом. Из нидерландского источника можно взять показатели для столкновения поездов с препятствиями в Нидерландах, а также для пожара – типичных событий, на которые приходится реагировать машинисту поезда [11]. В значительной степени машинист не успевает среагировать вообще, просто в силу большого тормозного пути поезда по отношению к его скорости. Это означает, что частота требований к машинисту находится примерно на одном уровне с приведенными выше значениями. Не вдаваясь в подробности, можно получить результат  $8,8 \cdot 10^{-5}$  1/ч для интенсивности требований. Это подтверждает выше выведенное значение.

Используя  $1/8760$  1/ч для преобразования значений PFD, полученных в 2.1, получаем результаты, приведенные в табл. 2.

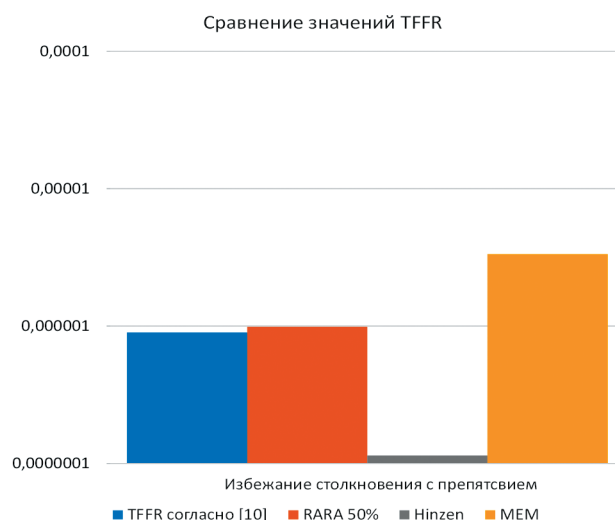
**Табл. 2. Результаты, полученные в разделе 2, и производные ставки**

| Источник                   | PFD              | TFFR                                                 |
|----------------------------|------------------|------------------------------------------------------|
| Hinzen<br>модифицированный | 0,001            | $1,14 \cdot 10^{-6}$ 1/ч                             |
| RARA<br>модифицированная   | 0,0029... 0,0086 | $3,31 \cdot 10^{-7}$ ...<br>$9,82 \cdot 10^{-7}$ 1/ч |

В проекте ATO-RISK проводились сравнительные расчеты для отдельных функций, при этом следует учитывать, что на результат влияют технические эксплуатационные барьеры, вновь создаваемые технологией ATO, и технические барьеры, исчезающие с удалением машиниста.

Кроме того, был проведен расчет на основе принципа MEM для принятия риска. Данные представлены на рис. 1.

Видно, что полученные значения TFFR на основе [10], RARA и MEM в принципе совпадают. Значения, полученные по Hinzen, меньше, что можно объяснить тем, что Hinzen не рассматривает весь процесс, начиная



**Рис. 1. Сравнение подходов [10] и RARA / Hinzen**

с восприятия, затем обработки и реакции, пренебрегая двумя другими этапами, что приводит к меньшим значениям, см. [11].

Главный результат заключается в том, что система, заменяющая машиниста поезда, должна иметь уровень полноты безопасности порядка SIL1 / SIL2. Важно отметить, что этот результат не распространяется на условия поддержки работы машиниста другими агентами на линии (как это предусмотрено в Правилах эксплуатации), например, диспетчером-контролером по безопасности, дежурным по станции, системой контроля бдительности машиниста и т.д. С учетом этих обстоятельств следует ориентироваться на то, что система, заменяющая машиниста поезда, должна иметь уровень полноты безопасности порядка SIL3 или даже выше.

Однако возможны и специфические ситуации, как, например, на голландской чисто грузовой линии BetuweRoute [1]. Для автоматизации этой линии необходимо учитывать следующие специфические условия:

- линия является чисто грузовой, пассажирские поезда по ней не ходят, что снижает тяжесть аварии. Единственным погибшим может быть машинист поезда, которого не было бы при автоматическом управлении;
- линия оснащена европейской системой ETCS, обеспечивающей непрерывное ограничение скорости и запрещающей проезд на красный свет светофора с уровнем SIL4;
- доступ на линию ограничен, линия полностью оборудована шумозащитными стенками, которые полностью исключают доступ на линию посторонних лиц и т.д.

В такой ситуации уровень полноты безопасности технических систем может быть даже снижен, возможно, до базовой полноты безопасности.

Конкретная реализация этих функций здесь рассматриваться не будет, ее необходимо оставить для конкретных проектов.



### 3. Интеграция в систему автоматической защиты поездов

В этом разделе мы рассмотрим ситуацию, в которой функции, заменяющие машиниста поезда, интегрированы в систему защиты поезда. Поскольку опыт работы с системами тяжелого рельсового транспорта SIL4 практически отсутствует (одно из немногих исследований можно найти в [12]), мы будем использовать результаты для городских транспортных систем. В рамках финансируемого Европейским Союзом исследовательского проекта ModSafe интенсивно изучались опасности, риски и меры по снижению рисков для автоматических городских транспортных систем.

Здесь различают степени автоматизации, начиная со степени 0 и заканчивая степенью 4. В табл. 3 перечисле-

ны все функции безопасности. Некоторые из них имеют отношение к машинисту, который будет заменен при внедрении системы АТО. К таким функциям относятся:

- обнаружение препятствий;
- предотвращение столкновения с людьми на путях;
- падение человека между транспортными средствами или на пути;
- контролировать состояние поезда.

На основе специального подхода к определению уровней полноты безопасности для выбранных четырех функций были получены следующие уровни полноты безопасности, предполагающие их реализацию в автономных системах [14].

Табл. 4 составлена для непрерывно используемых функций.

**Таблица 3 Степень автоматизации и функции безопасности (см. [13])**

|                                                                                                    | Основные функции управления движением                                                   | Операции в зоне прямой видимости GoA0 | Неавтоматизированное движение поездов с частичной автоблокировкой GoA1a | Неавтоматизированное движение поездов с автоблокировкой GoA1b | Полуавтоматическое управление поездами. GoA2 | Эксплуатация поездов без машиниста (DTO)GoA3 | Беспилотное движение поездов (БДП) GoA4 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Безопасное движение поездов                                                                        | Безопасная маршрута                                                                     | X                                     | Система                                                                 | Система                                                       | Система                                      | Система                                      | Система                                 |
|                                                                                                    | Безопасное расстояние между поездами                                                    | X                                     | Система                                                                 | Система                                                       | Система                                      | Система                                      | Система                                 |
|                                                                                                    | Ограничение скорости                                                                    | X                                     | X (Частично под контролем системы)                                      | Система                                                       | Система                                      | Система                                      | Система                                 |
| Водить поезд                                                                                       | Ускорение и тормоз                                                                      | X                                     | X                                                                       | X                                                             | Система                                      | Система                                      | Система                                 |
| Наблюдение пути                                                                                    | Детектирование препятствий                                                              | X                                     | X                                                                       | X                                                             | X                                            | Система                                      | Система                                 |
|                                                                                                    | Предотвращение столкновения с людьми на релсах                                          | X                                     | X                                                                       | X                                                             | X                                            | Система                                      | Система                                 |
| Обмена пассажирами                                                                                 | Управление дверями                                                                      | X                                     | X                                                                       | X                                                             | X                                            | X                                            | Система                                 |
|                                                                                                    | Падение пассажиров между поездом и платформы                                            | X                                     | X                                                                       | X                                                             | X                                            | X                                            | Система                                 |
|                                                                                                    | Безопасное отправление поезда                                                           | X                                     | X                                                                       | X                                                             | X                                            | X                                            | Система                                 |
| Другие функции                                                                                     | Ввод и вывод из эксплуатации подвижного состава                                         | X                                     | X                                                                       | X                                                             | X                                            | X                                            | Система                                 |
|                                                                                                    | Мониторинг состояния поезда                                                             | X                                     | X                                                                       | X                                                             | X                                            | X                                            | Система                                 |
| Обнаружение и управление опасными ситуациями                                                       | Диагностика, детектирование пожара, схода с рельсов управление чрезвычайными ситуациями | X                                     | X                                                                       | X                                                             | X                                            | X                                            | Система                                 |
| X – Ответственность персонала, который может быть опционально совмещен или контролировано системой |                                                                                         |                                       |                                                                         |                                                               |                                              |                                              |                                         |

**Табл. 4. Уровни полноты безопасности**

| Функция безопасности                                                                                         | Уровень полноты |       |       |       |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------|-------|-------|-------|
|                                                                                                              | GoA0            | GoA1  | GoA2  | GoA3  | GoA4  |
| Предотвращение травм, вызванных падением человека между платформой и поездом (вне ответственности персонала) | –               | 1 – 2 | 1 – 2 | 1 – 2 | 1 – 2 |
| Предотвращение травм, вызванных защемлением человека между экранными дверями платформы и поездом             | –               | 3     | 3     | 3     | 3     |

Так называемые функции по требованию были проанализированы в [15]. Здесь различные GoA не различались, а для случая, когда функция необходима, был выведен только уровень целостности безопасности. В соответствии с [15] для функций по требованию необходимо согласовать вероятность отказа по требованию, интенсивность спроса и допустимую интенсивность функциональных отказов. Этот же метод был применен в разделе 2 и использовался в работах [7–11].

В [15] перечислены следующие функции:

- обнаружение огня и дыма: SIL 3;
- контроль путей рядом с платформами: SIL 3.

Интересно, что MODSafe не дает явного результата для функции «обнаружение препятствий»: [14] ссылается на [15], а [15] поддерживает только утверждение, что обнаружение препятствий является функцией по требованию.

Для того чтобы определить уровень безопасности функций АТО, особенно обнаружения препятствий, в случае полностью интегрированной и автоматизированной системы, необходимо сделать предположения о системе защиты поезда.

Предположим, что система обнаружения препятствий интегрирована в систему технического зрения, которая также используется для определения состояния сигналов. Определение состояния сигналов относится к таким функциям, как безопасное движение поездов. В этом случае функция обнаружения сигналов должна иметь уровень SIL4, см., например, [14]. Поскольку обнаружение препятствий использует эту функцию и не может быть отделено от функции защиты поезда, оно также должно иметь уровень надежности SIL4. Это подтверждается исследованием [17], в котором заявлен уровень SIL4 для системы технического зрения, используемой для позиционирования поезда.

## Заключение

В данной работе рассмотрены требования и возможности различных подходов к системам автоматического управления поездом. Первый тип систем – это чисто вспомогательные системы, которые поддерживают машиниста, но не заменяют его. Вторая категория – это системы, которые непосредственно заменяют машиниста, не затрагивая существующую систему автоматической защиты поезда. К третьей категории относятся интегрированные системы, т.е. функции машиниста полностью интегрированы в систему защиты локомотива.

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

## Библиографический список

1. Hoekstra S., Middelkoop D., de Vries D. et al. ATO Verkenning Betuweroute Eindrapportage, 1.0, 21.7.2020, ProRail.
2. Lieskovsky A., Mysliviec I., Zemlicka M. Automatic Train Operation: History and Open Questions // VEHITS 2020 – 6th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems. 2020. Pp. 260-267.
3. Schäbe H. Autonomes Fahren auf der Schiene und der Straße – Erfahrungen nutzbar machen für die Schiene // Fachtagung Autonomes Fahren und Betriebshofautomatisierung im Schienenverkehr (30.09.2021 – 01.10.2021). Potsdam, 2021.
4. ERA, TSI revision 2022. Digital Rail and Green Freight. Changes proposed to the CCS TSI. Version 1.0, 2022-03-18.
5. Tigadi A., Gujanatti R., Ginchi A., Advanced Driver Assistance Systems // International Journal of Engineering Research and General Science. 2016. Vol. 4. Issue 3. Pp. 151-158.
6. Schäbe H., Wigger P. Experience with SIL Allocation in Railway Applications // 4th International Symposium “Programmable Electronic Systems in Safety Related Applications”, TÜV, 3-4 May 2000. Cologne, 2000.
7. Braband J., Evers B., Kinas M. et al. Risikoakzeptanzkriterien für das automatisierte Fahren auf der Schiene // Berichte des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung, Bericht 40 (2023). DOI: 10.48755/dzsf.230008.01
8. Braband J., Lindner L., Rexin F. Risk analysis for obstacle detection in automated driving // Signal & Data-communication. 2023. No. 3. Pp. 12-20.
9. Adebahr F., Schäbe H. Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler und Ausfallraten technischer ATO-systeme // Signal und Draht. 2023. Vol. 3(115). Pp. 21-29.
10. DIN VDE V 0831-103:2020-09 Электрические системы железнодорожной сигнализации – Часть 103: Определение требований безопасности для технических функций в железнодорожной сигнализации. 2020.
11. Braband J., Schäbe H. Risikoanalyse für das Automatisierte Fahren – Validierung und Erkenntnisse // Signal und Draht. 2023. Vol. 4(115). Pp. 6-12.
12. Шубинский И.Б., Розенберг Е.Н., Шебе Х. К оценке безопасности системы автоведения поездов // Надежность. 2021. Т. 21. № 4. С. 31-37.
13. MODSAFE, WP2–D2.2 Consistency analysis and Final hazard Analysis. TU Dresden, DEL\_D2.2\_TUD\_WP2\_100430\_V1.1, 2010-04-30.
14. MODSAFE, WP4–D4.2 Analysis of Safety requirements for MODSafe Continuous Safety Measures and Functions. DEL\_4.2\_UITP\_WP4\_11021\_V2.0, 2011-01-21
15. MODSAFE, WP4.3–D4.3 Analysis of On Demand Functions. DE\_D4.3\_3\_UITP\_WP4\_120220\_V 1.3, 2021-02-15.
16. vom Hövel R., Braband J., Schäbe H. The probability of failure on demand – the why and the how // Proc. Int. Conf. on Computer Safety, SafeComp 2009, LNCS 5775. Springer, Berlin-Heidelberg, 2009. Pp. 46-54.

17. Smaki B. Artificial Intelligence applications for railway signalling // KTH Stockholm, 2021.

## References

1. Hoekstra S., Middelkoop D., de Vries D. et al. ATO Verkenning Betuweroute Eindrapportage, 1.0, 21.7.2020, ProRail.
2. Lieskovsky A., Mysliviec I., Zemlicka M. Automatic Train Operation: History and Open Questions. In: Proceedings of VEHITS 2020 – 6th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems; 2020. Pp. 260-267.
3. Schäbe H. Autonomes Fahren auf der Schiene und der Straße – Erfahrungen nutzbar machen für die Schiene. Fachtagung Autonomes Fahren und Betriebshofautomatisierung im Schienenverkehr (30.09.2021 – 01.10.2021). Potsdam; 2021.
4. ERA, TSI revision 2022. Digital Rail and Green Freight. Changes proposed to the CCS TSI. Version 1.0, 2022-03-18.
5. Tigadi A., Gujanatti R., Ginchi A., Advanced Driver Assistance Systems. *International Journal of Engineering Research and General Science* 2016;4(3):151-158.
6. Schäbe H., Wigger P. Experience with SIL Allocation in Railway Applications. In: Proceedings of the 4th International Symposium “Programmable Electronic Systems in Safety Related Applications”, TÜV, 3-4 May 2000. Cologne; 2000.
7. Braband J., Evers B., Kinas M. et al. Risikoakzeptanzkriterien für das automatisierte Fahren auf der Schiene. Berichte des Deutschen Zentrums für Schienenverkehrsforschung, Bericht 40 (2023). DOI: 10.48755/dzsf.230008.01.
8. Braband J., Lindner L., Rexin F. Risk analysis for obstacle detection in automated driving. *Signal & Datacommunication* 2023;3:12-20.
9. Adebahr F., Schäbe H. Wahrscheinlichkeit menschlicher Fehler und Ausfallraten technischer ATO-systeme. *Signal und Draht* 2023;3(115):21-29.
10. DIN VDE V 0831-103:2020-09 Electric signalling systems for railways – Part 103: Identification of safety requirements for technical functions in railway signalling; 2020.
11. Braband J., Schäbe H. Risikoanalyse für das Automatisierte Fahren – Validierung und Erkenntnisse. *Signal und Draht* 2023;4(115):6-12.
12. Shubinsky I.B., Shaebe H., Rozenberg E.N. On the safety assessment of an automatic train operation system. *Dependability* 2021;4:31-37.
13. MODSAFE, WP2–D2.2 Consistency analysis and Final hazard Analysis. TU Dresden, DEL\_D2.2\_TUD\_WP2\_100430\_V1.1, 2010-04-30.
14. MODSAFE, WP4–D4.2 Analysis of Safety requirements for MODSafe Continuous Safety Measures and Functions. DEL\_4.2\_UITP\_WP4\_11021\_V2.0, 2011-01-21

15. MODSAFE, WP4.3–D4.3 Analysis of On Demand Functions. DE\_D4.3\_3\_UITP\_WP4\_120220\_V 1.3, 2021-02-15.

16. Vom Hövel R., Braband J., Schäbe H. The probability of failure on demand – the why and the how. In: Proc. Int. Conf. on Computer Safety, SafeComp 2009, LNCS 5775. Springer: Berlin-Heidelberg; 2009. Pp. 46-54.

17. Smaki B. Artificial Intelligence applications for railway signalling. KTH Stockholm; 2021.

## Сведения об авторах

**Розенберг Ефим Наумович** – профессор, доктор технических наук, первый заместитель Генерального директора, АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), Москва, Россия

**Шубинский Игорь Борисович** – профессор, доктор технических наук, главный эксперт, АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), Москва, Россия, e-mail: igor-shubinsky@yandex.ru

**Шебе Хендрик** – доктор естественных наук, главный специалист по надежности, готовности, ремонтпригодности и безопасности, TÜV Rheinland InterTraffic, Кёльн, Германия, e-mail: schaebe@de.tuv.com

## About the authors

**Efim N. Rozenberg**, Professor, Doctor of Engineering, First Deputy Director General, JSC Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation (JSC NIAS), Moscow, Russia.

**Igor B. Shubinsky**, Professor, Doctor of Engineering, Chief Expert, JSC Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation (JSC NIAS), Moscow, Russia. e-mail: igor-shubinsky@yandex.ru.

**Hendrik Schäbe**, Doctor of natural sciences, Main specialist on RAMS, TÜV Rheinland InterTraffic, Cologne, Germany, e-mail: schaebe@de.tuv.com.

## Вклад авторов в статью

Шубинский И.Б. сравнил различные подходы к автоматическому управлению поездом, Розенберг Е.Н. проанализировал предположения и их следствия, Шебе Х. Выполнил анализ различных системных архитектур

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



# Совершенствование методов управления эксплуатационной надежностью распределенных объектов энергетики

## Improving the methods for managing the operational dependability of distributed energy facilities

Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Абдуллаева С.А.  
Farhadzadeh E.M., Muradaliyev A.Z., Abdullayeva S.A.

Азербайджанский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт энергетики, Баку, Азербайджан  
Azerbaijan Scientific-Research and Design-Prospecting Institute of Energetic, Baku, Azerbaijan  
e-mail: elmeht@rambler.ru



Фархадзаде Э.М.



Мурадалиев А.З.



Абдуллаева С.А.

**Резюме.** Совершенствование управления техническим состоянием оборудования, устройств и установок, срок службы которых превышает нормативное значение, относится к важнейшим проблемам государственной безопасности, так как их относительное число уже превышает 60%. Приводятся результаты анализа литературных данных по этой проблеме, которые подтверждают ее актуальность и значимость. Важно отметить, что эти выводы относятся не только к электроэнергетическим системам, но и ко многим другим производственным системам. Основными трудностями решения анализируемой проблемы является, прежде всего, малочисленность статистических данных, характеризующих надежность работы, их многомерный и случайный характер. Авторами решение этой проблемы предлагается осуществить путем перехода от усредненных среднегодовых показателей надежности к среднемесячным показателям оперативной надежности. Приводится краткая характеристика решения отдельных задач этой проблемы для воздушных линий электропередачи, которые совместно и представляют новую методологию управления техническим состоянием объектов распределенного типа. Научоемкость, громоздкость и трудоемкость алгоритмов расчета обуславливают целесообразность перехода к интеллектуальным системам. При этом руководство электроэнергетической системы и отдельных ее производственных предприятий ежемесячно будут получать специализированные формы с указанием рекомендаций, оптимизирующих повышение надежности воздушных линий электропередачи путем восстановления износа.

**Abstract.** Improving the management of the technical state of equipment, devices, and installations, whose service life exceeds the respective standard value, is a most important problem of national security, as their proportion already exceeds 60%. The paper presents the findings of an analysis of literature data in the respective subject area that confirms its relevance and significance. Importantly, the findings apply not only to electrical power systems, but to many other industrial systems as well. The primary difficulties associated with solving the problem at hand are, first and foremost, the small quantity of statistical data that characterise operational dependability, their multidimensional and random nature. The authors suggest solving the problem by abandoning average annual dependability indicators in favour of average monthly operational dependability indicators. The authors provide a brief description of the individual solutions as part of the overall problem as regards overhead power lines that together represent a new methodology for managing the technical state of distributed facilities. The research-intensive, cumbersome, and time-consuming calculation algorithms suggest employing intelligent systems. The management of the electrical power system and its individual business units is to receive monthly specialised forms with recommendations as to the ways of improving the dependability of overhead power lines by restoring wear and tear.

**Ключевые слова.** Оперативная надежность, техническое состояние, автоматизированное управление, риск-ориентированный подход, эффективность работы, воздушные линии электропередачи.

**Keywords.** Operational dependability, technical state, automated management, risk-based approach, operational efficiency, overhead power lines.

**Для цитирования:** Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Абдуллаева С.А. Совершенствование методов управления эксплуатационной надежностью распределенных объектов энергетики // Надежность. 2025. №1. С. 11-18. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-1-11-18>

**For citation:** Farhadzadeh E.M., Muradaliyev A.Z., Abdullayeva S.A. Improving the methods for managing the operational dependability of distributed energy facilities. *Dependability 2025*; 1: 11-18. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-1-11-18>

**Поступила:** 26.05.2024 / **После доработки:** 23.12.2024 / **К печати:** 05.03.2025  
**Received on:** 26.05.2024 / **Revised on:** 23.12.2024 / **For printing:** 05.03.2025

## Введение

Одной из основных проблем электроэнергетических систем (далее – ЭЭС) является совершенствование управления техническим состоянием оборудования, устройств и установок (далее – объектов). Традиционно используемая для управления система планово-предупредительного ремонта (далее – ППР) уже не удовлетворяет предъявляемым требованиям, точнее – становится недостаточной. Это несоответствие возникло, прежде всего, потому, что в ЭЭС систематически возрастает относительное число однотипных объектов, срок службы которых превышает нормативное значение. Так, еще в 2012 г. в [1] отмечено, что ЭЭС России нуждаются в серьезной модернизации основных фондов и замене почти 50% физически и морально устаревшего оборудования.

В [2] отмечается, что срок службы примерно двух третьих ядерных реакторов превышает нормативное значение, внедряются программы по управлению старением. Старение объектов сопровождается увеличением числа и тяжести аварий, последствия которых не только приводят к большим материальным затратам, но и к нарушениям экологии, травмированию и гибели персонала, нарушениям безопасности государства.

В то же время, обязательная замена основных объектов, срок службы которых превышает нормативное значение, на новое не только создает большие экономические трудности, но и нецелесообразна. И, прежде всего, потому, что техническое состояние (далее – ТС) основных объектов в большей части случаев зависит не только от календарного срока службы, но и от условий эксплуатации и, прежде всего, от нагрузки.

## 1. Особенности методов управления ТС опасных производственных объектов

Наряду с ростом относительного числа объектов, срок службы которых превышает нормативное значение, увеличением числа недопустимых аварий, возрастает и число публикаций, в которых формируются основные замечания к методам управления ТС производственных объектов на основе риск-ориентированного подхода (далее – РОП).

Ниже приводится ряд мнений и рекомендаций о результатах применения этих методов за период с 2011 по 2020 годы, с которыми нельзя не согласиться. Но, прежде всего, условимся, что под «методом» мы будем понимать «инструмент» для решения поставленной задачи, под «подходом» – выбор определенного метода, а под методологией – объективную последова-

тельность методов решения исследуемой проблемы. Это уточнение терминов сформулировано на основе ознакомления с рядом научных исследований об их различии. К значимым рекомендациям, на наш взгляд, относятся следующие.

В [3] рассмотрены научные основы обеспечения безопасности производственных объектов. Отмечается, что:

- абсолютная безопасность опасных производственных объектов (далее – ОПО) *не может быть обеспечена в принципе*;

- риск оценки ТС ОПО – это количественная мера опасности возникновения недопустимых событий при отказах ОПО;

- основная задача руководителей ОПО – *поддержание нормативно установленного допустимого уровня опасности (риска)*;

- несмотря на разнообразие рекомендаций на тему «безопасность ОПО», они носят *декларативный характер*;

- основными направлениями совершенствования системы обеспечения безопасности ОПО являются:

- создание подхода к современному (оперативному) учету влияния ТС ОПО на безопасность;

- учет *многофакторности воздействия* на безопасность ОПО.

В [4] отмечается, что для обеспечения безопасности ОПО нефтегазового комплекса все большее значение приобретает решение задач, связанных с *предупреждением* возможных аварийных ситуаций и минимизацией технологических и экологических *рисков*. Существующие в настоящее время методики оценки рисков промышленной безопасности *не учитывают* постоянно изменяющийся во времени нестационарный *случайный характер рисков*.

В [5] отмечается, что анализ рисков – бурно развивающееся *междисциплинарное* научное направление, в котором:

- до сих пор *не сформулирован и существенно отличается по отраслям* понятийный аппарат анализа риска;

- сугубо *большой* удельный вес используемых количественных показателей надежности и *несовершенство* методологии их использования (формирование интегральных показателей надежности);

- несовершенство имеющейся методической базы. Все расчеты *рекомендуется проводить в точечной постановке*.

В [6] отмечается, что недостатками существующих методов количественной оценки риска являются:

- оценка вероятности наступления события проводится по *ограниченному объему* исходных статистических данных;

– несмотря на громоздкость и наукоемкость методов, расчеты выполняются *вручную*;

– не учитывается *многомерный* характер риска.

В [7] отмечается, что количественные оценки частоты возникновения отказов однотипных объектов *отличаются друг от друга на два-четыре* порядка. Анализ причин такого расхождения показывает:

– объем исходных данных *недостаточен*;

– при выполнении расчетов принимается целый ряд *недопустимых* предположений;

– *наличие существенных ошибок* в расчетах показателей надежности вследствие *недостаточной квалификации* исполнителей;

– чем больше показателей, характеризующих надежность ОПО, *тем разброс результатов расчета больше*.

## 2. Особенности нормативных методов управления ТС ОПО ЭЭС

К нормативным методам управления ТС ОПО ЭЭС относятся, прежде всего [8, 9]. К сожалению, отмеченные выше недостатки методов обеспечения безопасности ОПО в [8, 9] не устранены. Да, не были учтены, несмотря на то, что опыт практического использования этих методов обсуждался на научно-практических конференциях на тему «Контроль технического состояния оборудования объектов электроэнергетики», проводимых в 2018 и 2019 гг. [10, 11].

В то же время в [12] отмечается, что:

– вероятность наступления события в будущем определяется на основе частоты появления этого события в прошлом. При этом *не учитывается* возможность корректировки действий, преобразующих поток событий;

– наблюдается *недостаточный объем и неоднородность* выборки статистических данных об отказах;

– такие показатели как количество, частота и средняя тяжесть несчастных случаев *являются совершенно безосновательными*;

– статистика прошлых лет (для 3–5 лет) в полном соответствии с правилами теории вероятностей и математической статистики *непригодна*, так как неслучайна и неоднородна.

В [13] отмечается:

– в обозримом будущем энергокомпании будут вынуждены решать задачу обеспечения надежности при *высоком износе оборудования и недостатке ресурсов*;

– наряду с системами ППР и ремонта по ТС целесообразно ввести *систему ремонта на основе РОП*.

– существующие методики прогнозирования ТС ОПО на основе *РОП не охватывают* ЛЭП и устройства напряжением 0,4–10 кВ. Но эти ЛЭП составляют около 90% протяженности сетей, относятся к распределительной электрической сети (далее – РЭС) и являются источниками 80% аварий;

– методики [8] и [9] *активно используются в ЭЭС РФ*;

– дискретный индекс технического состояния (далее – ИТС) служит основой для *ранжирования* объектов

ЭЭС (при этом не учитывается случайный характер исходных данных);

– для управления оперативной ремонтной деятельностью, рассчитываемый ИТС *неприемлем*.

– имеются *значительные пробелы* в нормативном регулировании РОП.

## 3. Рекомендуемые подходы управления техническим состоянием воздушных ЛЭП

Объекты ЭЭС классифицируются на объекты непрерывного (трансформаторы) и дискретного (выключатели) действия, сосредоточенные (энергоблоки) и распределенные (ЛЭП). Это различие обуславливает различие числа показателей их надежности и способов оценки. Учитывая, что более 80% аварий в ЭЭС связано с РЭС [13], рассмотрим решение этой проблемы для воздушных ЛЭП (далее – ВЛЭП).

Вышеизложенное позволяет заключить, что совершенствование управления ТС ВЛЭП ЭЭС предусматривает возможность объективного решения ряда задач, к числу которых, прежде всего, относятся:

1. Ранжирование предприятий распределительной сети (далее – ПРС) по степени старения (далее – СТ) эксплуатируемых ВЛЭП и распознавание ПРС, СТ ВЛЭП которых наибольшая;

2.1. Оценка объективных показателей надежности ВЛЭП;

2.2. Преодоление субъективности выборочного освидетельствования;

3. Учет случайного характера оценок оперативных показателей надежности и различия степени технического использования ВЛЭП при:

– сравнение оценок в расчетном и предшествующих ему месяцах;

– ранжирование ПРС;

– распознавание «слабых звеньев»;

4. Учет случайного и многомерного характера оперативной надежности ВЛЭП ЭЭС при:

– ранжирование ПРС;

– распознавание «слабых звеньев»;

5. Оценка объективности рекомендуемых методов и алгоритмов;

6. Минимизация риска ошибочного решения при методической поддержке руководства ЭЭС и ПРС.

Прежде всего, уточним наше отношение к принятой системе проектирования систем электроснабжения. И, в частности, к обеспечению надежности электроснабжения с учетом категории потребителей и требований Правил устройства электроустановок.

Многoletний опыт проектирования и эксплуатации систем электроснабжения свидетельствует о том, что в подавляющем большинстве случаев введенные в эксплуатацию системы электроснабжения удовлетворяют предъявляемым требованиям. Следовательно, сомневаться в безошибочности методов проектиро-



вания не приходится. При этом риск возникновения недопустимых событий существует (напомним, что абсолютная безопасность исключается [3]), хотя он и незначительный.

Следовательно, смысл контроля ТС системы электроснабжения заключается совсем не в оценке изменений последствия нарушения электроснабжения. Возможные последствия известны из проектной документации. Не изменение размеров последствий вызывает изменение надежности объектов систем электроснабжения, а наоборот. Изменение показателей надежности изменяет размеры возможных последствий. Таким образом, при анализе ТС объектов электроснабжения достаточно оценить значимость изменения оценок показателей надежности объектов. Но значимость изменения показателей надежности конкретных объектов определить, как правило, невозможно, так как отказов могло и не быть, или их так мало, что количественные оценки оказываются не достоверными. Если учесть к тому же, что таких объектов в ЭЭС тысячи и даже десятки тысяч, то громоздкость и трудоемкость расчетов к тому же обуславливают высокий риск ошибочного решения и несомненные преимущества интуитивного подхода специалистов.

Но можно подойти к решению проблемы несколько иначе. Обобщим некоторые полученные нами и опубликованные в 2021 г. результаты решения проблемы для ВЛЭП.

В [14] анализируются количественные оценки СТ ВЛЭП (см. пункт 1) Показано, что *используемая на практике* оценка относительного числа ВЛЭП, срок службы которых превышает нормативное значение, *неприемлема* для сопоставления и ранжирования СТ ВЛЭП ПРС ЭЭС. Разработан метод и алгоритм решения этой задачи.

В [15] (см. пункты 2.1 и 2.2) отмечается, что ТС ВЛЭП целесообразно оценивать *оперативными показателями надежности работы*. Среднемесячные значения вероятности автоматических аварийных отключений ВЛЭП вычисляются по данным оперативных журналов. Результаты объективной классификации позволяют выявить «слабые звенья» и тем самым распознать ВЛЭП, в наибольшей степени снижающие эффективность работы ЭЭС. Снижение риска ошибочного решения при освидетельствовании ТС ВЛЭП достигается рекомендуемым методом формирования представительной выборки подлежащих испытанию элементов этих ВЛЭП.

В [16] (см. пункт 3) рекомендуется новый метод и алгоритм оперативной оценки и сравнения показателей надежности ВЛЭП. Отличительной особенностью метода расчета является учет степени технического использования ВЛЭП. Алгоритм оценки показателей оперативной надежности разработан для удельного числа аварийных автоматических отключений ВЛЭП, для устойчивых отказов, вероятности устойчивого отказа и

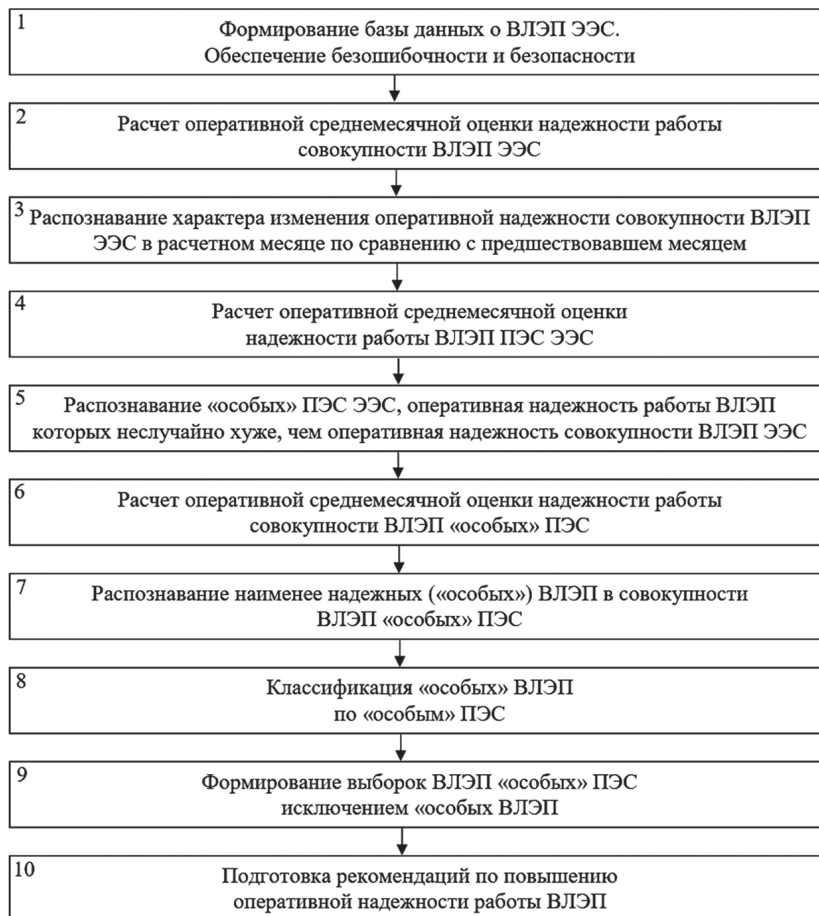


Рис. 1. Укрупненная блок-схема алгоритма повышения оперативной надежности работы ВЛЭП ЭЭС



| Дата анализа<br><b>05 мая 2021</b> год                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Главному инженеру ЭЭС |              |                       |                  |                       |                  |                   |            |                   |            |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------|-----------------------|------------------|-----------------------|------------------|-------------------|------------|-------------------|------------|---|--------------|--------------|---|--------------|------------|---|--------------|----------------|---|--------------|------------|---|--------------|----------------|---|--------------|------------|---|--------------|----------------|---|--------------|--------------|----|------------|--------------|
| <b>Сведения<br/>об оперативной надежности воздушных ЛЭП<br/>в апреле месяце 2021 года</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                       |              |                       |                  |                       |                  |                   |            |                   |            |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
| 1. По сравнению с предшествующим месяцем оперативная надежность ВЛЭП ЭЭС <b>снизилась</b> ;<br>2. В таблице А приведены размещенные в порядке уменьшения усредненные среднемесячные оценки оперативной надежности работы ВЛЭП ЭСП ЭЭС.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                       |              |                       |                  |                       |                  |                   |            |                   |            |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
| Таблица А. Сведения об оперативной надежности ВЛЭП ЭСП ЭЭС                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |                       |              |                       |                  |                       |                  |                   |            |                   |            |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
| <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <th>№ п/п</th> <th>Наименование ЭСП</th> <th>Рейтинг ЭСП</th> <th>№ п/п</th> <th>Наименование ЭСП</th> <th>Рейтинг ЭСП</th> </tr> <tr> <td>1</td> <td><i>ЭСП 5</i></td> <td><i>Хор</i></td> <td>6</td> <td><i>ЭСП 9</i></td> <td><i>Удовл</i></td> </tr> <tr> <td>2</td> <td><i>ЭСП 3</i></td> <td><i>Хор</i></td> <td>7</td> <td><i>ЭСП 6</i></td> <td><i>Неудовл</i></td> </tr> <tr> <td>3</td> <td><i>ЭСП 7</i></td> <td><i>Хор</i></td> <td>8</td> <td><i>ЭСП 2</i></td> <td><i>Неудовл</i></td> </tr> <tr> <td>4</td> <td><i>ЭСП 8</i></td> <td><i>Хор</i></td> <td>9</td> <td><i>ЭСП 4</i></td> <td><i>Неудовл</i></td> </tr> <tr> <td>5</td> <td><i>ЭСП 1</i></td> <td><i>Удовл</i></td> <td>10</td> <td><i>ЭЭС</i></td> <td><i>Удовл</i></td> </tr> </table> |                       | № п/п        | Наименование ЭСП      | Рейтинг ЭСП      | № п/п                 | Наименование ЭСП | Рейтинг ЭСП       | 1          | <i>ЭСП 5</i>      | <i>Хор</i> | 6 | <i>ЭСП 9</i> | <i>Удовл</i> | 2 | <i>ЭСП 3</i> | <i>Хор</i> | 7 | <i>ЭСП 6</i> | <i>Неудовл</i> | 3 | <i>ЭСП 7</i> | <i>Хор</i> | 8 | <i>ЭСП 2</i> | <i>Неудовл</i> | 4 | <i>ЭСП 8</i> | <i>Хор</i> | 9 | <i>ЭСП 4</i> | <i>Неудовл</i> | 5 | <i>ЭСП 1</i> | <i>Удовл</i> | 10 | <i>ЭЭС</i> | <i>Удовл</i> |
| № п/п                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Наименование ЭСП      | Рейтинг ЭСП  | № п/п                 | Наименование ЭСП | Рейтинг ЭСП           |                  |                   |            |                   |            |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
| 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <i>ЭСП 5</i>          | <i>Хор</i>   | 6                     | <i>ЭСП 9</i>     | <i>Удовл</i>          |                  |                   |            |                   |            |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
| 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <i>ЭСП 3</i>          | <i>Хор</i>   | 7                     | <i>ЭСП 6</i>     | <i>Неудовл</i>        |                  |                   |            |                   |            |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
| 3                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <i>ЭСП 7</i>          | <i>Хор</i>   | 8                     | <i>ЭСП 2</i>     | <i>Неудовл</i>        |                  |                   |            |                   |            |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
| 4                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <i>ЭСП 8</i>          | <i>Хор</i>   | 9                     | <i>ЭСП 4</i>     | <i>Неудовл</i>        |                  |                   |            |                   |            |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
| 5                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <i>ЭСП 1</i>          | <i>Удовл</i> | 10                    | <i>ЭЭС</i>       | <i>Удовл</i>          |                  |                   |            |                   |            |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
| 3. В таблице Б1 приведены паспортные данные ВЛЭП ЭЭС, оценки оперативной надежности которых как и рейтинг их ЭСП неудовлетворительный.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |                       |              |                       |                  |                       |                  |                   |            |                   |            |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
| Таблица Б1.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                       |              |                       |                  |                       |                  |                   |            |                   |            |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
| <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <th rowspan="2">№ п/п</th> <th colspan="2">Наименование</th> <th rowspan="2">Класс напряжения, кВ.</th> <th rowspan="2">Срок службы, лет</th> <th rowspan="2">Протяженность, км</th> <th rowspan="2">Исполнение</th> </tr> <tr> <th>ЭСП</th> <th>ВЛЭП</th> </tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </table>                                                                                                                                                                                                                                            |                       | № п/п        | Наименование          |                  | Класс напряжения, кВ. | Срок службы, лет | Протяженность, км | Исполнение | ЭСП               | ВЛЭП       |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
| № п/п                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Наименование          |              | Класс напряжения, кВ. | Срок службы, лет |                       |                  |                   |            | Протяженность, км | Исполнение |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | ЭСП                   | ВЛЭП         |                       |                  |                       |                  |                   |            |                   |            |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                       |              |                       |                  |                       |                  |                   |            |                   |            |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                       |              |                       |                  |                       |                  |                   |            |                   |            |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                       |              |                       |                  |                       |                  |                   |            |                   |            |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
| 4. В таблице Б2 приведены паспортные данные ВЛЭП ЭЭС, рейтинг оперативной надежности которых неудовлетворительный, а срок службы не превышает нормативное значение.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                       |              |                       |                  |                       |                  |                   |            |                   |            |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
| Таблица Б2.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                       |              |                       |                  |                       |                  |                   |            |                   |            |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
| <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <th rowspan="2">№ п/п</th> <th colspan="2">Наименование</th> <th rowspan="2">Класс напряжения, кВ.</th> <th rowspan="2">Срок службы, лет</th> <th rowspan="2">Протяженность, км</th> <th rowspan="2">Исполнение</th> </tr> <tr> <th>ЭСП</th> <th>ВЛЭП</th> </tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </table>                                                                                                                                                                                                                                            |                       | № п/п        | Наименование          |                  | Класс напряжения, кВ. | Срок службы, лет | Протяженность, км | Исполнение | ЭСП               | ВЛЭП       |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
| № п/п                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | Наименование          |              | Класс напряжения, кВ. | Срок службы, лет |                       |                  |                   |            | Протяженность, км | Исполнение |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | ЭСП                   | ВЛЭП         |                       |                  |                       |                  |                   |            |                   |            |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                       |              |                       |                  |                       |                  |                   |            |                   |            |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                       |              |                       |                  |                       |                  |                   |            |                   |            |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                       |              |                       |                  |                       |                  |                   |            |                   |            |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
| 5. Рекомендации по повышению оперативной надежности:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                       |              |                       |                  |                       |                  |                   |            |                   |            |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
| 5.1. Провести выборочное освидетельствование ВЛЭП, указанных в табл. Б1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                       |              |                       |                  |                       |                  |                   |            |                   |            |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
| 5.2. Установить и устранить причины автоматических отключений ВЛЭП, приведенных в табл. Б2.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |                       |              |                       |                  |                       |                  |                   |            |                   |            |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |
| 5.3. Организовать для персонала ЭСП, указанных в табл. Б1, курсы повышения квалификации по проблеме обслуживания стареющих ВЛЭП                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |                       |              |                       |                  |                       |                  |                   |            |                   |            |   |              |              |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |            |   |              |                |   |              |              |    |            |              |

Рис. 2. Результаты анализа среднемесячной оперативной надежности ВЛЭП ЭЭС

коэффициента технического использования. Сравнение оценок для двух смежных оперативных интервалов предполагается проводить на основе граничных значений фидуциальных интервалов.

В [17] (см. пункт 4) разработан новый алгоритм оценки целесообразности классификации многомерных данных об отказах и длительности простоя ВЛЭП.

Разработан метод и алгоритм оценки оперативного интегрального показателя надежности, физическая сущность которого адекватна износу ТС. Разработан метод и алгоритм сравнения интегральных показателей оперативной надежности с учетом ошибки первого и второго рода. Разработан метод и алгоритм ранжирования показателей оперативной надежности, по-

звоящий выявить ВЛЭП, требующие оперативного освидетельствования.

В [18] (см. пункт 5) на примере статистических данных об отказах магистральных ВЛЭП 110 и 220 кВ приводятся результаты оценки и сравнения оперативной надежности работы. Целью анализа вручную является распознавание разновидностей признаков, для которых удельное число устойчивых отказов будет в наибольшей степени превышать этот показатель для совокупности ВЛЭП. Выявленные значимые разновидности признаков полностью совпадали с результатами выбора наименее надежных ВЛЭП на основе интуитивного подхода, что подтверждает безошибочность рекомендуемого метода количественного анализа.

В [19] предлагается метод и алгоритм автоматизированного сравнительного анализа (бенчмаркинга) оперативной надежности объектов РЭС. Переход от интуитивного подхода к количественному подходу оперативного распознавания «слабых звеньев» среди тысяч однотипных объектов позволил снизить риск ошибочного решения при организации их технического обслуживания и ремонта.

В иллюстративных целях на рис. 1 приведена укрупненная блок-схема алгоритма, которая на основе методов, изложенных в [14–19], позволяет автоматизировать процесс формирования рекомендаций для повышения оперативной надежности работы ВЛЭП ЭЭС.

#### 4. Информационная и методическая подготовка технического руководства ЭЭС и каждого ЭСП

Результаты ежемесячного автоматизированного контроля оперативной надежности работы ВЛЭП и рекомендации по повышению эффективности работы формализуются в виде специальных форм и обеспечивают информационную и методическую поддержку технического руководства ЭЭС и каждого ПЭС.

В иллюстративных целях на рис. 2 приведен один из вариантов исполнения этих форм.

#### Заключение

Актуальность совершенствования методов управления эксплуатационной надежностью подтверждается не только для ЭЭС, но и для многих других производственных систем.

Решение этой проблемы предлагается осуществить переходом к анализу интегральных показателей оперативной надежности.

Методы расчета интегральных показателей оперативной надежности, учета случайного характера количественных оценок, оценки целесообразности классификации данных по разновидностям признаков сравнения и ранжирования оценок формируют методологию системы управления оперативной надежностью в ЭЭС.

Эти методы основаны на фидуциальном подходе, имитационном моделировании представительных выборок, учете ошибок первого и второго рода

Наукоемкость, громоздкость и трудоемкость ручного счета, высокий риск субъективных ошибок и предпосылок обуславливают необходимость перехода к интеллектуальным системам управления объектами, срок службы которых превышает нормативное значение.

Автоматизированное управление оперативной надежностью повышает значимость интуитивного подхода при реализации методических рекомендаций, ограничивающих риск ошибочного решения.

#### Библиографический список

1. Бердников Р.Н., Дементьев Ю.А., Моржин Ю.И. и др. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью // Энергия единой сети. 2012. № 4(4). С. 4–11.
2. Безопасное управление сроками эксплуатации атомных электростанций INSAG-14 / Доклад международной группы по ядерной безопасности. Серия по безопасности № INSAG-14. IAEA, Вена, 2014. 47 с.
3. Кузьмин А.А. Организация обеспечения безопасности опасного производственного объекта на основе количественной оценки состояния его системы безопасности // Технология гражданской безопасности. 2011. Т. 8. № 4(30). С. 72–79.
4. Абурахманов Н.Х., Шайбаков Р.А., Марков А.Б. Информационные модели управления минимизацией рисков потенциально опасных производственных объектов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2015. № 57. С. 729–736.
5. Колесников Ф.Ю. Основные проблемы методологии анализа риска аварий // Пожаробезопасность. 2016. Т. 25. № 2. С. 4–8.
6. Лисанов М.В., Печеркин А.С., Швыряев А.А. Методическое обеспечение и проблемы анализа риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазового комплекса // Повышение надежности и безопасности объектов газовой промышленности. 2017. № 1(29). С. 179–184.
7. Лисанов М.В., Сумской С.И., Швыряев А.А. Неопределенность количественной оценки риска аварий на нефтегазовых объектах // Повышение надежности и безопасности объектов газовой промышленности. 2018. № 2(34). С. 125–135.
8. Методика оценки технического состояния основного технологического оборудования и линий электропередачи электрических станций и электрических сетей. Утверждена приказом Минэнерго РФ от 26 июля 2017 г. № 676. 30 с.
9. Методические указания по расчету вероятности отказа функционального узла и единицы основного технологического оборудования и оценки последствий такого отказа. Утверждена приказом Минэнерго России от 19 февраля 2019 г. № 123. 35 с.
10. V Научно-практическая конференция «Контроль технического состояния объектов электроэнергетики». / Электроэнергия. Передача и распределение.

2019 г. № 1(52). URL: <https://eepir.ru/article/v-nauchno-prakticheskaya-konferenciya-kontroly-tehnicheskogo-sostoyaniya-oborudovaniya-obyektov-elektroenergetiki/> (дата обращения: 27.12.2024).

11. VI Научно-практическая конференция «Контроль технического состояния объектов электро-энергетики». / Электроэнергия. Передача и распределение. 2020. № 1(58). URL: <https://eepir.ru/new/obzor-dokladov-vi-nauchno-prakticheskoy-konferencii-kontroly-tehnicheskogo-sostoyaniya-i-obnarugenie-mest-povregdeniy-oborudovaniya-podstanciy-vozdushnyh-i-kabelnyh-linij/> (дата обращения: 27.12.2024).

12. Федорец А.Г. Применение современной методологии риск-менеджмента в системах менеджмента безопасности и охраны труда // Безопасность и охрана труда. 2018. № 1. С. 1-18.

13. Антоненко И.Н. Анализ риск-ориентированного подхода к управлению физическими активами // Промышленная энергетика. 2020. № 10. С. 57-60.

14. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Абдуллаева С.А. и др. Автоматизированный анализ срока службы воздушных ЛЭП электроэнергетических систем // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. Т. 64. № 5. С. 435-445. DOI: 10.21122/1029-7448-2021-64-5-435-445

15. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Абдуллаева С.А. и др. Оценка технического состояния воздушных высоковольтных ЛЭП на этапе их старения // Надежность и безопасность энергетики. 2021. Т. 14. № 2. С. 100-107. DOI: 10.24223/1999-5555-2021-14-2-100-107

16. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Абдуллаева С.А. и др. Количественная оценка оперативной надежности воздушных линий электропередач // Электрические станции. 2021. № 2. С. 28-34. DOI: 10.34831/EP.2021.1081.8.004

17. Farhadzadeh E.M., Muradaliyev A.Z., Abdullayeva S.A. Estimation, comparison and ranking of operational reliability indicators of overhead transmission lines of electric power systems // Reliability: Theory & applications. 2021. Vol. 4. No 65. Pp. 186-197. DOI: 10.24412/1932-2321-2021-465-186-196

18. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Абдуллаева С.А. Количественный анализ оперативной надежности воздушных линий электропередачи // Оперативное управление в электроэнергетике. 2021. № 5. С. 16-24.

19. Фархадзаде Э.М., Мурадалиев А.З., Абдуллаева С.А. Совершенствование оперативного управления эффективностью работы распределительных сетей // Промышленная энергетика. 2021. № 12. С. 16-23. DOI: 10.34831/EP.2021.77.85.002

## References

1. Berdnikov R.N., Dementiev Yu.A., Morzhin Yu.I. et al. [The main provisions of the concept of an intelligent energy system with an active adaptive network]. *Energia yedinoj seti* 2012;4(4):4- 11. (in Russ.)

2. [Safe Life Management of Nuclear Power Plants INSAG-14. Report of the International Nuclear Safety Group. INSAG Safety Series no. 14]. IAEA, Vienna; 2014.

3. Kuzmin A. Organizations to Ensure Safety of Dangerous Industrial Based on the Quantitative Estimation of its Security System. *Civil Security Technology* 2011;8(4(30):72-79. (in Russ.)

4. Abdrakhmanov N.Kh., Shaybakov R.A., Markov A.G. Information models of management of minimization of risks potentially hazardous production facilities. *Mining informational and analytical bulletin* 2015;57:729-736. (in Russ.)

5. Kolesnikov E.Yu., Anokhin V. V., Maslov E. F. [Main problems of emergency risk assessment methodology]. *Pozharovzryvobezopasnost – Fire and Explosion Safety* 2016;25(2):5–9. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.5-9. (in Russ.)

6. Lisanov M.V, Pecherkin A.S., Sumskey S.I., Shvyryayev A.A. Methodical ware and issues of emergency risk analysis at dangerous industrial facilities of the oil-and-gas complex. *Gas Science Bulletin* 2017;1(29):179-184. (in Russ.)

7. Lisanov M.V, Sumskey S.I., Shvyryayev A.A. Uncertainties of the quantitative emergency risk assessment at oil-gas facilities. *Gas Science Bulletin* 2018;2(34):125-135. (in Russ.)

8. [Methodology for assessing the technical state of the essential process equipment and power transmission lines of power plants and electric grids]. Approved by the Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated July 26, 2017 No. 676. (in Russ.)

9. [Methodological guidelines for calculating the probability of failures of a functional unit and a unit of basic process equipment and assessing the consequences of such failures]. Approved by Order No. 123 of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated February 19, 2019. (in Russ.)

10. V Research and practical conference “Equipment condition monitoring of power engineering facilities”. *ELECTRIC POWER. Transmission and distribution* 2019;1(52):18-21 (accessed: 27.12.2024). Available at: <https://eepir.ru/article/v-nauchno-prakticheskaya-konferenciya-kontroly-tehnicheskogo-sostoyaniya-oborudovaniya-obyektov-elektroenergetiki/>. (in Russ.)

11. Modern Digital Technologies Used for Monitoring and Estimation of Power Object Technical Condition. *ELECTRIC POWER. Transmission and distribution* 2020;1(58):18-26 (accessed: 27.12.2024). Available at: <https://eepir.ru/new/obzor-dokladov-vi-nauchno-prakticheskoy-konferencii-kontroly-tehnicheskogo-sostoyaniya-i-obnarugenie-mest-povregdeniy-oborudovaniya-podstanciy-vozdushnyh-i-kabelnyh-linij/>. (in Russ.)

12. Fedorets A.G. [Using the modern risk management methodology in occupational health and safety management systems]. *Bezopasnost i okhrana truda* 2018;1:1-18. (in Russ.)

13. Antonenko I.N. [Analysing the risk-based approach to physical asset management]. *Industrial Power Engineering* 2020;10:57-60. (in Russ.)



14. Farkhadzade E.M., Muradaliyev A.Z., Abdullayeva S.A., Nazarov A.A. Automated Analysis of Service Life of Air-Lines of the Electricity Transmission of Electric Power Systems. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2021;64(5):435-445. DOI: 10.21122/1029-7448-2021-64-5-435-445. (in Russ.)

15. Farkhadzade E.M., Muradaliyev A.Z., Muradaliyev S.A., Nazarov A.A. Assessment of technical condition of high-voltage overhead power transmission lines at the stage of their ageing. *Safety and Reliability of Power Industry* 2021;14(2):100-107. (in Russ.)

16. Farkhadzade E.M., Muradaliyev A.Z., Abdullayeva S.A. et al. [Quantitative estimation of the operating reliability of aerial power lines]. *Elektricheskiye stantsii* 2021;2:28-34. DOI: 10.34831/EP.2021.1081.8.004. (in Russ.)

17. Farkhadzade E.M., Muradaliyev A.Z., Abdullayeva S.A. Estimation, comparison and ranking of operational reliability indicators of overhead transmission lines of electric power systems. *Reliability: Theory & Applications* 2021;4(65):186-197. DOI: 10.24412/1932-2321-2021-465-186-196.

18. Farkhadzade E.M., Muradaliyev A.Z., Abdullayeva S.A. Quantitative analysis of the operational reliability of overhead lines. *Operativnoe upravlenie v elektroenergetike* 2021;5:16-24. (in Russ.)

19. Farkhadzade E.M., Muradaliyev A.Z., Abdullayeva S.A. Improving of the operational management of the efficiency of distribution networks. *Industrial Power Engineering* 2021;12:16-23. DOI: 10.34831/EP.2021.77.85.002. (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 the 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 dependability 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, Dependability of Power System Equipment, AzNIPPI Energetika, Baku. His field of research is quantitative estimation of individual dependability of equipment and devices of electrical power systems.

E-mail: aydin\_murad@yahoo.com. Address: 94 G. Zardabi Ave.

**Samira A. Abdullayeva, 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, Dependability of Power System Equipment, Azerbaijan Research and Design and Survey Institute of Power Engineering, Baku.

## Вклад авторов в статью

**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 целостности статьи.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

# Разработка алгоритма оптимизации календарно-сетевого планирования строительства метро с учетом ограниченных ресурсов на основе теории графов

## Developing a graph-based algorithm for optimising scheduling and network planning as part of subway construction subject to limited resources

Собин А.Е.<sup>1\*</sup>  
Sobin A.E.

<sup>1</sup>АО ЧУ ВО «Московский финансово-юридический университет МФЮА», Москва, Российская Федерация  
Moscow University of Finance and Law MFUA, Moscow, Russian Federation  
\*view7goog757@gmail.com



Собин А.Е

**Резюме.** С увеличением масштабов городской застройки и расширением агломераций становится все более важным создание устойчивых, эффективно функционирующих и экологически безопасных систем транспорта, обеспечивающих удобство и доступность. В частности, строительство метрополитенов играет ключевую роль в улучшении доступности и стимулировании экономического прогресса. Учитывая высокую сложность и финансовые затраты, связанные с реализацией таких крупных проектов, необходимы инновационные методы планирования для уменьшения рисков и эффективного использования ресурсов. **Цель** исследования заключается в разработке передового алгоритма планирования, основанного на принципах теории графов, который способен максимально эффективно управлять ресурсами. **Методы.** В работе представлены результаты всестороннего изучения актуальных в области улучшения процессов планирования в строительстве и интеграции теории графов для повышения управляемости комплексных систем, в том числе и при строительстве подземного транспорта. На протяжении исследования внимание сосредоточено на монографическом методе анализа, который раскрывает каждый элемент изучаемой проблематики, и использовании рефлексивного метода для осмысления полученной информации и выведения аргументированных заключений. Сочетание данных методов позволило не только оценить, но и подтвердить преимущества предложенной оптимизационной стратегии, сфокусированной на повышении эффективности и адаптивности в строительных проектах, особенно в части строительства метрополитенов, с учетом специфики и требований реальной практики. **Результаты.** Отмечается существенная роль графовой теории в повышении эффективности строительства подземного метрополитена. Применение этого математического подхода позволяет усовершенствовать систему управления проектами, учитывая ограничения по ресурсам. Теория графов выступает здесь как ключевой элемент, который структурирует и упорядочивает сложные процессы, а также обеспечивает быструю адаптацию к любым изменениям в ходе строительства. Особенность разработанного алгоритма заключается в том, что он способствует максимальной эффективности распределения ресурсов, уменьшению времени простоя и избеганию задержек на различных этапах проекта. Таким образом, повышается точность планирования и общая экономическая эффективность строительных работ. В работе также уделено внимание аспекту многоцелевой оптимизации. Этот подход позволяет добиться идеального баланса сроков, бюджета и качества строительства, что немаловажно для подобных масштабных и ресурсоемких проектов, как строительство метрополитенов. **Выводы.** Эффективное использование предложенного алгоритма существенно повысит управленческую аккуратность, сократит расходы и время, требуемое на реализацию строительных проектов, делая данный метод не только актуальным, но и необходимым для успешного осуществления крупных строительных задач. В результате, открываются новые возможности для исследований и внедрения данных подходов в градостроительное планирование и создание крупномасштабной инфраструктуры. Данная статья будет особенно интересна специалистам в области урбанистики, инженерам-строителям, исследователям, занимающимся оптимизацией процессов, а также менеджерам проектов, которые отвечают за планирование и успешную реализацию крупномасштабных строительных проектов.

**Abstract.** The growing urban development and expanding metropolitan areas emphasise the importance of sustainable, efficient, and environmentally friendly transportation systems that

provide convenience and accessibility. In particular, the construction of subways plays a key role in improving accessibility and stimulating economic progress. Given the high complexity and financial costs that such large projects entail, innovative planning methods are needed to reduce risks and use resources efficiently. This study **aims** to develop an advanced graph-based planning algorithm that would be able to manage resources as efficiently as possible.

**Methods.** The paper presents the results of a comprehensive study of topical publications as regards the improvement of civil engineering processes and integration of the graph theory to enhance the controllability of complex systems, e.g., as part of subway construction. The study focused on the monographic method of analysis that reveals each element of the examined problems, and the use of the reflexive method to comprehend the obtained information and draw substantiated conclusions. The combination of the above methods allowed not only to evaluate, but also to confirm the advantages of the proposed optimisation strategy focused on improving the efficiency and adaptability in construction projects, especially in the construction of subways, taking into account their specificity and real-world requirements. **Results.** The paper notes the significant role of the graph theory in improving the efficiency of subway construction. The application of this mathematical method allows improving the project management system taking into account the limited resources. The graph theory acts as the key element that brings structure and order to complex processes, as well as ensures rapid adaptation to any changes in the course of the construction activities. The developed algorithm is special in that it contributes to a most efficient resource allocation, reduced downtime and eliminates delays at various stages of a project. Thus, a higher accuracy of planning and the overall economic efficiency of construction activities are achieved. The paper also delves into multiobjective optimisation. This method enables a perfect balance of construction time, budget, and quality, which is important for such large-scale and resource-intensive projects as subway construction. **Conclusions.** An efficient use of the proposed algorithm will significantly improve the quality of management, reduce the costs and time required for the delivery of construction projects, which makes the method not only relevant, but also vital to their success. That opens up new opportunities for research and application of the above methods in urban planning and deployment of major infrastructures. The paper will be of particular interest to urban planners, civil engineers, process optimisation researchers, as well as project managers responsible for the planning and successful delivery of large-scale civil engineering projects.

**Ключевые слова:** теория графов, оптимизация строительства, планирование ресурсов, строительство метрополитенов, календарно-сетевое планирование, управление проектами, алгоритмы оптимизации.

**Keywords:** graph theory, construction optimisation, resource planning, subway construction, scheduling and network planning, project management, optimization algorithms.

**Для цитирования:** Собин А.Е.. Разработка алгоритма оптимизации календарно-сетевого планирования строительства метро с учетом ограниченных ресурсов на основе теории графов // Надежность. 2025. №1. С. 19-27. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-1-19-27>

**For citation:** Sobin A.E. Developing a graph-based algorithm for optimising scheduling and network planning as part of subway construction subject to limited resources. Dependability 2025;1:19-27. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-1-19-27>

**Поступила:** 27.07.2024 / **После доработки:** 16.12.2024 / **К печати:** 05.03.2025

**Received on:** 27.07.2024 / **Revised on:** 16.12.2024 / **For printing:** 05.03.2025

## Введение

В контексте ускоренного градостроительства и роста городских агломераций, роль улучшения транспортной сети, в частности, строительство метрополитенов, несомненно велика. Это закладывает основу для быстрого и эффективного передвижения населения и, следовательно, для социального и экономического прогресса. В этом аспекте острая потребность в разработке новых подходов к оптимизации планирования, основанных на теории графов, становится не просто значимой, но и стратегически важной задачей. Такие методы могут значительно сократить как временные затраты, так и финансовые издержки в строительстве, выступая

ключевым инструментом в борьбе с бюджетными и временными ограничениями. Создание инновационного алгоритма для календарно-сетевого планирования, особенно учитывая ограниченность ресурсов, обещает повышение точности и экономичности в строительных мегапроектах. Важно, что такой инструмент позволяет оперативно адаптироваться к переменчивым условиям, что является критически важной способностью в динамичной среде строительных проектов. Оптимизация распределения ресурсов, минимизация простоев, эффективное использование рабочих и техники, и предотвращение задержек в работе проектов – эти преимущества делают данное направление выдающимся



не только в академическом, но и в прикладном исследовании, открывая новые горизонты для индустрии строительства и урбанистики.

## 1. Обзор источников

В сфере оптимизационного планирования теория графов получила признание за свою эффективность в управлении организационными процессами и экономии времени, что подтверждается научными наблюдениями О. Распопова [1]. Особо важное значение теория графов приобретает в строительной отрасли, где точное планирование и координация действий имеют решающее значение. Исследование С. Туманова, опубликованное в 2023 году, демонстрирует, что применение современных информационных систем моделирования в сочетании с сетевыми графами значительно улучшает процесс планирования [2]. Кроме того, Р.Б. Трегубов внес свой вклад, разработав инновационный аналитический инструментарий, который объединяет графовые модели и вероятностный анализ для усовершенствования оптимизации многослойных систем [3]. Параллельные вычисления, как отмечается в работах С. Назарова и А. Барсукова, выпущенных в 2021 году, также продвинулись благодаря применению сетевого анализа [4]. В области стратегического планирования строительных проектов И.Л. Киевский в 2022 году предложил новые методики, нацеленные на повышение стабильности систем [5]. Теория графов также находит все более широкое применение в таких областях как военная инженерия, представленная трудами М. Нгуена и И. Иванова [6], экономика, логистика, машинное обучение, где О. Пичугина [7] выделила ее роль в оптимизации протоколов, и сервисный сектор, исследованный С.А. Кропивенцевой [8]. Тем не менее, существует потребность в дополнительных исследованиях, направленных на разработку алгоритмов для улучшения стратегии строительства метрополитенов, что остается важной и малоизученной темой.

## 2. Методы

В данной работе было выполнено глубокое исследование в области оптимизации процессов планирования в сфере строительства, с особым вниманием к строительству подземного транспорта. Изучение актуальных научных работ привело к интеграции принципов теории графов, что способствует повышению контроля над сложными строительными системами. Основопологающим в данной работе явился монографический подход, который позволил детализированно рассмотреть каждую составляющую проблемы. В дополнение к этому, рефлексивный метод дал возможность глубже проанализировать собранные данные и сформулировать обоснованные выводы. Эта комбинация исследовательских методов не только способствовала анализу, но также подтвердила значи-

мость предложенной стратегии оптимизации. Данная стратегия направлена на улучшение эффективности и адаптивности управления строительными проектами. Она особенно актуальна для строительства метрополитенов, учитывая их особенности и практические требования.

## 3. Результаты

Изучение влияния графовой теории на эффективность строительных процессов, особенно при возведении метрополитенов, стало ключевым в данном исследовании. Этот математический инструмент обеспечивает улучшение управления проектами на фоне ресурсных ограничений. Внедрение теории графов приводит к лучшей структуризации проектных процессов, создавая условия для гибкой реакции на изменения, что критически важно при выполнении строительных работ. Специально разработанный алгоритм, основанный на графовой теории, направлен на оптимизацию использования ресурсов, сокращение времени простоев и уменьшение риска задержек на всех этапах работы. Это в свою очередь ведет к повышению точности в планировании и эффективности строительных задач в экономическом аспекте. Кроме того, в работе уделено пристальное внимание многоцелевой оптимизации. Применение этого подхода позволяет достичь оптимального соотношения между сроками выполнения работ, затратами и качеством готового объекта, что особенно важно для таких крупных и требующих значительных ресурсов проектов, как строительство метрополитенов.

## 4. Обсуждение

Применение теории графов играет ключевую роль в современных методиках календарно-сетевого планирования строительства. Как показывает анализ исследований М.А. Фетисова и коллег, опубликованный в 2021 году, оптимизация расписания с учетом ключевых параметров, включая сроки выполнения работ, бюджет проекта и пропускную способность, может значительно повысить эффективность строительных проектов [9]. Вклад авторов заключается в выработке методологической основы, позволяющей анализировать и адаптировать планирование к изменяющимся обстоятельствам. Сетевой анализ стал неотъемлемой частью в области инвестиционного планирования строительства, обеспечивая тщательное структурирование и кодирование проектных задач. Исследование Е. Буценко и А. Шорикова, осветило, как сетевые графики способствуют синхронизации различных проектных операций с параметрами плана, что существенно упрощает процесс управления сложными строительными проектами [10]. Объектно-ориентированные подходы, раскрытые А. Аничкиным и В. Семеновым, открыли новые возможности в проектировании планировочных программ [11]. Эти фрейм-

ворки стимулировали развитие продвинутых систем управления проектами, адаптированных к специфике и требованиям современного строительства. Кроме того, исследователи под руководством А.В. Катаева разработали математические модели, которые обеспечивают принятие наилучших решений о распределении задач между исполнителями [12]. Такие модели учитывают структуру проектной сети, что позволяет максимизировать эффективность проектной деятельности с точки зрения времени и ресурсов. Научное исследование, выполненное Т. Саламой и О. Мозелхи в 2019 году, затрагивает методику многоцелевой оптимизации, которая особенно ценна при работе с нестабильными или неопределенными условиями, характерными для строительных площадок.

Авторами предложен подход, основанный на генетических алгоритмах, позволяющий минимизировать сроки, затраты и периоды простоя в процессе строительства [13]. Такой инструмент становится незаменимым в ситуациях, когда существует риск колебаний производительности, неоднородности доступных ресурсов или их ограниченности. Многоцелевые алгоритмы применимы для адаптации к меняющимся обстоятельствам строительства метрополитенов, где необходимо

сбалансировать использование ресурсов и следовать жестким срокам.

Научная статья, опубликованная М.-Ю. Ченгом и коллегами, вносит значимый вклад в понимание того, как улучшить управление несколькими ресурсами в рамках разных строительных проектов. Авторы представили концепцию использования техники поиска дискретных симбиотических организмов для минимизации нестабильности в использовании ресурсов. Они указывают на важность устранения необходимости постоянного найма и увольнения рабочих в ответ на изменяющиеся потребности проекта. Акцентируется внимание на том, что разработка стратегий оптимального распределения ресурсов является ключевым элементом для повышения эффективности [14]. В области строительного планирования анализ, проведенный Ю. Тангом и его командой, вносит существенный вклад, особенно в тему оптимизации линейных графиков строительства с использованием техник программирования ограничений. Эти методы позволяют прецизионно настраивать и управлять сложными связями, возникающими между множеством задач, особенно актуальных в масштабных проектах, каковым является строительство метрополитенов [15].

**Табл. 1. Сравнительный анализ алгоритмов оптимизации планирования строительства метрополитенов**

| Метод                        | Описание                                                                                                   | Преимущества                                                                   | Недостатки                                                                  | Приложения                                  |
|------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|
| Критический путь (CPM)       | Определяет наиболее длинный путь через сетевую диаграмму проекта, определяя ключевые задачи.               | Простота понимания и использования, точное планирование сроков.                | Не учитывает изменения ресурсов и условий.                                  | Планирование времени выполнения проекта     |
| Программирование ограничений | Решает планирование задач, учитывая сложные зависимости и ограничения ресурсов.                            | Гибкость в управлении изменениями, подходит для сложных проектов.              | Сложно настраивать, требует специализированного ПО.                         | Гибкое планирование проектов                |
| Генетические алгоритмы       | Используют методы эволюционной оптимизации для нахождения решений в больших и сложных пространствах.       | Эффективны для многоцелевой оптимизации, хороши в сложных условиях.            | Вычислительно затратны, результаты могут быть неоднозначными.               | Многоцелевая оптимизация расписаний         |
| Линейное программирование    | Используется для минимизации или максимизации линейной целевой функции при заданных линейных ограничениях. | Точное решение для оптимизации распределения ресурсов.                         | Ограничен комплексными условиями, которые не всегда линейны.                | Оптимизация распределения ресурсов          |
| Симуляция Монте-Карло        | Применяется для оценки рисков и неопределенностей путем моделирования различных сценариев.                 | Помогает оценить риски и вероятности различных исходов проекта.                | Не предоставляет конкретного плана действий, основан на случайных выборках. | Анализ рисков и неопределенностей           |
| Перестановочные множества    | Исследует возможные перестановки задач для оптимизации планирования.                                       | Подходит для решения задач с несколькими последовательностями и ограничениями. | Может быть сложным в реализации и анализе.                                  | Улучшение эффективности и сокращение сроков |

**Табл. 2. Алгоритм оптимизации календарно-сетевого планирования строительства метро с учетом ограниченных ресурсов на основе теории графов: этапы разработки, методы, цели и инструменты (авторская разработка)**

| Этап                              | Действия/Методы                                         | Цели/Задачи                                                                                                 | Инструменты                                                                                        |
|-----------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Формализация задачи               | Определение узлов и ребер графа                         | Представление каждой задачи или этапа строительства как узла графа; установление зависимостей между этапами | Графические редакторы, специализированное ПО для моделирования графов                              |
|                                   | Ввод ограничений ресурсов                               | Распределение ресурсов (рабочая сила, оборудование, материалы) среди задач                                  | Системы управления проектами, ПО для управления ресурсами                                          |
| Применение теории графов          | Топологическая сортировка                               | Упорядочивание задач для планирования последовательности работ                                              | Алгоритмические библиотеки, такие как NetworkX или Graph-tool                                      |
|                                   | Поиск критического пути                                 | Определение наиболее времязатратных последовательностей, минимизация общего времени проекта                 | Программное обеспечение для критического пути, например, Microsoft Project                         |
|                                   | Оптимизация распределения ресурсов                      | Минимизация времени выполнения и стоимости, учитывая ограничения                                            | Оптимизационное ПО, например, MATLAB или R                                                         |
| Интеграция с методами оптимизации | Линейное программирование                               | Оптимизация распределения ресурсов, соблюдение ограничений                                                  | Солверы линейного программирования, например, Gurobi или CPLEX                                     |
|                                   | Многоцелевая оптимизация (напр. генетические алгоритмы) | Нахождение оптимального баланса между стоимостью, временем и качеством строительства                        | Средства разработки генетических алгоритмов, например, DEAP в Python                               |
| Прототипирование и тестирование   | Разработка программного обеспечения                     | Моделирование и тестирование алгоритма на данных реальных проектов                                          | Интегрированные среды разработки (IDE), например, Visual Studio или PyCharm                        |
|                                   | Анализ результатов и корректировка алгоритма            | Улучшение алгоритма на основе анализа данных и обратной связи                                               | Системы анализа данных и машинного обучения, например, Python с библиотеками Pandas и Scikit-learn |
| Итерация и улучшение              | Постоянное улучшение алгоритма                          | Адаптация и оптимизация алгоритма в ответ на изменяющиеся условия и результаты применения                   | Платформы для управления версиями, например, Git; системы непрерывной интеграции                   |

Программирование ограничений служит ключом к гармонизации работы разнообразных этапов проекта, осуществляя тем самым плавное движение к его завершению без излишних задержек.

Исследование, проведенное И. Бакри и коллегами, внесло значимый вклад в понимание процесса планирования в строительстве, особенно акцентируя внимание на важности интеграции методов буферизации и планирования в условиях неопределенности. Традиционные методы планирования часто недооценивают значимость потенциальных рисков и неопределенностей, характерных для динамичной строительной отрасли, в частности, при строительстве метрополитена. Создание запасов и использование надежных алгоритмов планирования делают возможным минимизировать риски, связанные с неожиданными обстоятельствами, укрепляя устойчивость проектов перед лицом изменчивых условий [16].

В сфере практик планирования выделяется методика определения графика проекта с помощью периодического планирования, базирующегося на размерах партий (Batch-Size-Based Repetitive Scheduling Method, BRSM), разработанная специалистами Е. Шим и Б. Ким. Этот подход упрощает составление графиков и поддается адаптации для специфических условий метростроения. Он направлен на эффективную корректировку плановых процедур, что способствует повышению общей эффективности управления проектами [17]. Дополнительно, идеи превентивного планирования, озвученные Х.А. Ал-нассери и Р. Аулином, акцентируют внимание на стратегическом учете будущих изменений и возможностей. Подход предусматривает интеграцию потенциальных будущих событий в планы, что позволяет опережать необходимость принятия решений и совершения действий, чтобы избежать отклонений от изначальных планов.



Применение данных стратегий в области строительства метрополитенов способствует точному управлению неопределенностями и предотвращению возможных проблем [18]. Исследование алгоритмов для оптимизации планирования процессов строительства инфраструктуры метрополитена охватывает разработку и проверку разнообразных стратегий, основанных на принципах теории графов. Важной целью этих стратегий является рационализация распределения ограниченных ресурсов и временных рамок. Основной задачей такого подхода является уменьшение общих сроков и финансовых затрат на строительные работы, повышая тем самым эффективность всего проекта (табл. 1).

Применение алгоритмов оптимизации, основанных на теории графов, в процессах календарного и сетевого планирования при строительстве метрополитенов способствует значительному улучшению управленческих процессов. Такие алгоритмы становятся ключевыми в деле минимизации общих расходов и снижения продолжительности строительных этапов. Однако для достижения наилучших результатов выбор метода должен базироваться на детальном анализе конкретных особенностей проекта, включая ограничения по ресурсам и степень сложности предстоящих работ. Конечным этапом в анализе существующих методологий в области строительства метрополитенов является разработка инновационного алгоритма (табл. 2).

Представленный алгоритм, полученный в результате глубокого изучения тем мультикритериальной оптимизации, рационального распределения ресурсов, ограничений в планировании и стратегий управления неопре-

деленностями, обещает внести значительный вклад в улучшение практик календарно-сетевого планирования. Нововведение опирается на концепции, заимствованные из теории графов и анализа современных исследований, и направлено на обеспечение большей эффективности в решении специфических задач, связанных со строительством метрополитенов. Таким образом, этот подход предлагает более стратегическое и экономически оправданное использование ресурсов при строгом соблюдении графика работ. Разработаем модель для анализа алгоритмов улучшения календарного планирования в проектах. Эта модель будет включать в себя серию задач с определенными между ними связями. Применим Python и библиотеку NetworkX для построения и анализа направленного графа, который отражает структуру задач. В ходе работы будет использован алгоритм для выявления наиболее важного пути, который определяет критические точки в рамках проектного планирования. Задачи строительства метро, включая время выполнения и зависимости: разработка проекта (*A*, 20 дней), подготовка стройплощадки (*B*, 10 дней), туннелирование (*C*, 30 дней), укладка рельсов (*D*, 15 дней), строительство станций (*E*, 40 дней), электромонтажные работы (*F*, 25 дней), тестирование и пусконаладочные работы (*G*, 20 дней); *B* зависит от *A*, *C* зависит от *B*, *D* и *E* зависят от *C*, *F* зависит от *E*, *G* зависит от *F*. Напишем код для создания графа, определения критического пути и симуляции выполнения проекта (рис. 1).

Программа предназначена для построения модели графа, которая описывает ряд взаимосвязанных задач. Она не только выявит критический путь, но и даст

```
import networkx as nx
# Создание направленного графа
G = nx.DiGraph()
# Добавление узлов с временем выполнения как атрибут
tasks = {
    'A': 20, 'B': 10, 'C': 30, 'D': 15, 'E': 40, 'F': 25, 'G': 20
}
G.add_nodes_from(tasks.items(), label='duration')
# Добавление зависимостей (рёбер)
dependencies = [('A', 'B'), ('B', 'C'), ('C', 'D'), ('C', 'E'), ('E', 'F'), ('F', 'G')]
G.add_edges_from(dependencies)
# Вычисление критического пути
def compute_critical_path(G):
    # Расчет веса каждой задачи как отрицательного времени выполнения для использования в алгоритме поиска кратчайшего пути
    for node in G:
        G.nodes[node]['weight'] = -G.nodes[node]['duration']
    # Поиск кратчайшего пути с учетом «весов» задач
    path_length, path = nx.single_source_bellman_ford(G, source='A', target='G', weight='weight')
    return -path_length, path # Возвращаем положительное значение длительности
# Выполнение расчета
critical_duration, critical_path = compute_critical_path(G)
print(«Критический путь:», critical_path)
print(«Общая длительность критического пути:», critical_duration, «дней»)
# Тестирование изменений в зависимостях
G.remove_edge('C', 'D')
G.add_edge('B', 'D')
critical_duration, critical_path = compute_critical_path(G)
print(«Новый критический путь после изменения зависимостей:», critical_path)
print(«Новая общая длительность критического пути:», critical_duration, «дней»)
```

Рис. 1. Код для создания графа, определения критического пути и симуляции выполнения на Python

возможность анализировать влияние модификаций взаимозависимости задач на общий период реализации проекта. Полученные данные сравниваются в контексте «до» и «после» внесенных корректировок, что позволяет оценить эффективность произведенных изменений на ход проектных работ.

Для демонстрации эффективности предложенного алгоритма рассмотрим модельную задачу, отражающую процесс планирования строительства метро. Исходные данные для расчета:

- разработка проекта (A) – 20 дней;
- подготовка стройплощадки (B) – 10 дней (зависит от A);
- туннелирование (C) – 30 дней (зависит от B);
- укладка рельсов (D) – 15 дней (зависит от C);
- строительство станций (E) – 40 дней (зависит от C);
- электромонтажные работы (F) – 25 дней (зависит от E);
- тестирование и пусконаладочные работы (G) – 20 дней (зависит от F).

Процесс расчета включает несколько ключевых шагов, начиная с анализа различных этапов проекта и их влияния друг на друга. Каждый этап моделируется как отдельный элемент (узел) и связан с другими этапами стрелками, обозначающими их взаимозависимость, создавая структуру, известную как граф задач. Граф строится с применением информации о продолжительности и взаимосвязях каждого этапа. Следующий шаг – определение критического пути с помощью специального вычислительного метода. Критический путь представляет собой самую продолжительную цепочку задач, которая определяет минимальный срок завершения проекта в целом. Алгоритм в этом этапе проверяет все возможные маршруты задач в графе, суммирует длительность каждой задачи и выделяет самый длительный путь – критический. Финальный этап включает оптимизацию распределения ресурсов. Цель здесь – перераспределить ресурсы по задачам, соблюдая заданные ограничения для уменьшения временных и финансовых затрат. Оптимизация зависит от анализа узких мест в проекте, особенно на критическом пути, что помогает ускорить общее время реализации проекта. Граф задач был визуализирован с использованием би-

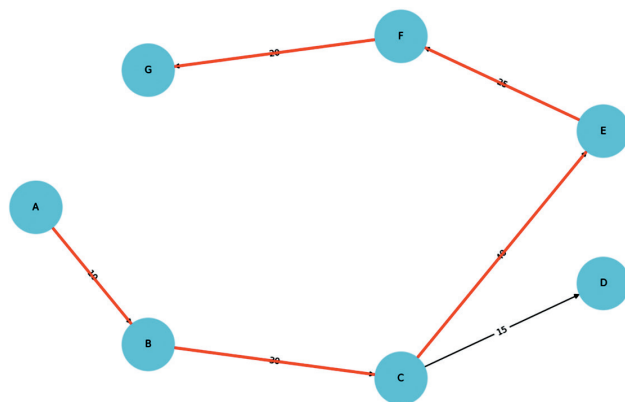


Рис. 2. Граф задач и критический путь

блиотек Python. Красным цветом выделен критический путь, а значения указывают продолжительность задач. Визуализация позволяет легко выявить узкие места проекта и принять решения по оптимизации (рис. 2).

Выявлен критический путь:  $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow E \rightarrow F \rightarrow G$ .

Общая длительность проекта по критическому пути составила 145 дней.

Применение предложенного алгоритма позволяет эффективно планировать и управлять крупномасштабными проектами, такими как строительство метро, за счет точного анализа взаимозависимостей задач и оптимального использования ресурсов.

## Заключение

Итак, применение теории графов в оптимизации календарно-сетевого планирования является мощным инструментом, который предоставляет возможности для повышения производительности и оптимизации расходов в процессе реализации масштабных строительных проектов, включая разработку метрополитенов. Такой подход способствует более глубокому пониманию и управлению проектами, открывая дорогу к значительному улучшению процессов планирования и исполнения.

## Библиографический список

1. Raspopov O.S. The application of graph theory and automata to solve dynamics problems Steinbach system // Science and Transport Progress. 2010. No. 34. Pp. 136-141. DOI: 10.15802/stp2010/9237
2. Туманов С.Л., Гущина Ю.В., Макрушин Н.С. и др. Информационное моделирование на этапе планирования строительства // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2023. № 23(3). С. 30-36. DOI: 10.14529/build230304
3. Tregubov R.B. Composite method of reliability research for hierarchical multilayer routing systems // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2016. No. 5(16). Pp. 879-892. DOI: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-879-892
4. Назаров С., Барсуков А. Оптимизация параллельных вычислений бортовых систем реального времени. Часть 2 // Электроника НТБ. 2021. № 1(202). С. 130-136. DOI: 10.22184/1992-4178.2021.202.1.130.136
5. Киевский И.Л., Аргунов С.В., Жаров Я.В. и др. Алгоритмизация систем планирования, управления и обработки информации в строительстве // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 11. С. 14-24. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.11.14-24
6. Нгуен М.К., Иванов И.Н. Направления повышения эффективности управления эксплуатацией военной техники вьетнамской народной армии // Вестник университета. 2017. № 11. С. 11-16. DOI: 10.26425/1816-4277-2017-11-11-16
7. Pichugina O.S. Optimization over the general signed permutation set of permutations // System research and

information technologies. 2017. No. 4. Pp. 74-96. DOI: 10.20535/srit.2308-8893.2017.4.07

8. Kropiventseva S.A., Sedova M.A. Reducing the duration of service for passengers of departure flight and evaluating the cost of the service process // *Intellect. Innovation. Investments*. 2019. Vol. 8. Pp. 98-105. DOI: 10.25198/2077-7175-2019-8-98

9. Фетисова М.А., Халымова Т.А., Серегин М.Ю. и др. Анализ исторического развития методов оптимизации планирования в строительстве // *Тенденции развития науки и образования*. 2021. № 75(1). С. 150-152. DOI: 10.18411/lj-07-2021-34

10. Бученко Е.В., Шориков А.Ф. Сетевое моделирование процесса управления инвестиционным проектированием и его приложения // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. 2016. № 233(6). С. 233-244. DOI: 10.5862/je.233.24

11. Аничкин А.С., Семенов В.А. Объектно-ориентированный каркас для программной реализации приложений теории расписаний // *Труды Института системного программирования РАН*. 2017. № 29(3). С. 247-296. DOI: 10.15514/ispras-2017-29(3)-14

12. Катаев А.В., Катаева Т.М., Макарова Е.Л. Управление проектами: математические модели оптимального назначения исполнителей проектных работ // *Известия Саратовского университета. Новая серия*. 2016. № 3(16). С. 294-299. DOI: 10.18500/1994-2540-2016-16-3-294-299

13. Salama T. Moselhi O. Multi-objective optimization for repetitive scheduling under uncertainty // *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2019. No. 7(26). Pp. 1294-1320. DOI: 10.1108/ecam-05-2018-0217

14. Cheng M.-Y., Prayogo D., Tran D.-H. Optimizing Multiple-Resources Leveling in Multiple Projects Using Discrete Symbiotic Organisms Search // *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2016. No. 30(3). DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000512

15. Tang Y., Liu R., Wang F., Sun Q., Kandil A. Scheduling Optimization of Linear Schedule with Constraint Programming // *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2017. No. 33(2). Pp. 124-151. DOI: 10.1111/mice.12277

16. Bakry I., Moselhi O., Zayed T. Optimized scheduling and buffering of repetitive construction projects under uncertainty // *Engineering, Construction and Architectural Management*. 2016. No. 23(6). Pp. 782-800. DOI: 10.1108/ecam-05-2014-0069

17. Shim E., Kim B. Batch-Size Based Repetitive Scheduling Method (BRSM) // *International Journal of Construction Education and Research*. 2014. No. 10(2). Pp. 140-156. DOI: 10.1080/15578771.2013.826753

18. AlNasseri H., Aulin R. Assessing Understanding of Planning and Scheduling Theory and Practice on Construction Projects // *Engineering Management Journal*. 2015. No. 27(2). Pp. 58-72. DOI: 10.1080/10429247.2015.1035963

## References

1. Raspopov O.S. The application of graph theory and automata to solve dynamics problems Steinbach system. *Science and Transport Progress* 2010;34:136-141. DOI: 10.15802/stp2010/9237.

2. Tumanov S.L., Gushchina Y.V., Makrushin N.S., Risunov A.R., Kalinovskiy S.A. Information modeling at the stage of construction planning. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture* 2023;23(3):30-36. DOI: 10.14529/build230304. (in Russ.)

3. Tregubov R.B. Composite method of reliability research for hierarchical multilayer routing systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics* 2016;5(16):879-892. DOI: 10.17586/2226-1494-2016-16-5-879-892.

4. Nazarov S., Barsukov A. Optimization of parallel computing for onboard real-time systems. Part 2. *Electronics: Science, Technology, Business* 2021;1:130-136. DOI: 10.22184/1992-4178.2021.202.1.130.136. (in Russ.)

5. Kievskiy I.L., Argunov S.V., Zharov Ya.V. et al. [Algorithmisation of planning, management, and processing of information in civil engineering]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo* 2022;11:14-24. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.11.14-24. (in Russ.)

6. Nguyen M.C., Ivanov I. Directions of improving the efficiency of operation management of military engineering of the Vietnamese People's Army. *Vestnik Universiteta* 2017;(11):11-16. <https://doi.org/10.26425/1816-4277-2017-11-11-16>. (in Russ.)

7. Pichugina O.S. Optimization over the general signed permutation set of permutations. *System research and information technologies* 2017;4:74-96. DOI: 10.20535/srit.2308-8893.2017.4.07.

8. Kropiventseva S.A., Sedova M.A. Reducing the duration of service for passengers of departure flight and evaluating the cost of the service process. *Intellect. Innovation. Investments* 2019;8:98-105. DOI: 10.25198/2077-7175-2019-8-98.

9. Fetisova M.A., Khalymova T.A., Seregin M.Yu. et al. [Analysis of the historical development of methods for optimising planning in construction]. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* 2021;75(1):150-152. DOI: 10.18411/lj-07-2021-34. (in Russ.)

10. Butsenko E.V., Shorikov A.F. Network modelling of the process of managing investment planning and its applications. *St. Petersburg Polytechnical University Journal* 2016;233(6):233-244. DOI: 10.5862/je.233.24. (in Russ.)

11. Anichkin A.S., Semenov V.A. Object-oriented framework for software development of scheduling applications. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS* 2017;29(3):247-296. DOI: 10.15514/ISPRAS-2017-29(3)-14. (in Russ.)

12. Kataev A.V., Kataeva T.M., Makarova E.L. Project Management: Mathematical Models of Optimal Executors' Appointment for Project Works. *Izvestiya Saratovskogo*

universiteta. *Novaya seriya* 2016;3(16):294-299. DOI: 10.18500/1994-2540-2016-16-3-294-299. (in Russ.)

13. Salama T. Moselhi O. Multi-objective optimization for repetitive scheduling under uncertainty. *Engineering, Construction and Architectural Management* 2019;7(26):1294-1320. DOI: 10.1108/ecam-05-2018-0217.

14. Cheng M.-Y., Prayogo D., Tran D.-H. Optimizing Multiple-Resources Leveling in Multiple Projects Using Discrete Symbiotic Organisms Search. *Journal of Computing in Civil Engineering* 2016;30(3). DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000512.

15. Tang Y., Liu R., Wang F., Sun Q., Kandil A. Scheduling Optimization of Linear Schedule with Constraint Programming. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 2017;33(2):124-151. DOI: 10.1111/mice.12277.

16. Bakry I., Moselhi O., Zayed T. Optimized scheduling and buffering of repetitive construction projects under uncertainty. *Engineering, Construction and Architectural Management* 2016;23(6):782-800. DOI: 10.1108/ecam-05-2014-0069.

17. Shim E., Kim B. Batch-Size Based Repetitive Scheduling Method (BRSM). *International Journal of Construction Education and Research* 2014;10(2):140-156. DOI: 10.1080/15578771.2013.826753.

18. AlNasser H., Aulin R. Assessing Understanding of Planning and Scheduling Theory and Practice on Construction Projects. *Engineering Management Journal* 2015;27(2):58-72. DOI: 10.1080/10429247.2015.1035963.

## Сведения об авторе

**Собин Артем Евгеньевич**, аспирант кафедры «Информационные системы и технологии» АО ЧУ ВО «Московский финансово-юридический университет МФЮА», view7goog757@gmail.com; Публикации: Вакуров Артем Евгеньевич (была смена фамилии в 2023 году): Бюлле-

тедь науки и практики (2018, Т.4, №8, с.148-153; 2019, Т.5, №6, с.234-238; 2019, Т.5, №6, с.239-244; 2019, Т.5, №6, с.245-253; 2019, Т.5, №6, с.254-258), БСТ: Бюллетень строительной техники (2018, №12 (1012), с.52-53), Собин Артем Евгеньевич: Инфокоммуникационные технологии (2023, Т.21, №3, с.62-70).

## About the author

**Artem E. Sobin**, postgraduate student, Department of Information Systems and Technologies, Moscow University of Finance and Law (MFUA), view7goog757@gmail.com; Publications: **Artem E. Vakurov** (there was a change of name in 2023): Bulletin of Science and Practice (2018, Vol. 4, No. 8, pp. 148-153; 2019, Vol. 5, No. 6, pp. 234-238; 2019, Vol. 5, No. 6, p. 239-244; 2019, Vol. 5, No. 6, pp. 245-253; 2019, Vol. 5, No. 6, pp. 254-258), BST: Bulletin stroitelnoy tekhniki (2018, No.12 (1012), pp. 52-53), **Artem E. Sobin**: Info-communication Technologies (2023, Vol. 21, No. 3, pp. 62-70).

## Вклад автора в статью

Автором проведен анализ литературы, посвященной современным подходам к планированию строительства метрополитенов. На основании изученных источников была сформирована концептуальная основа работы, включающая ключевые принципы теории графов. Разработан алгоритм календарно-сетевого планирования на основе теории графов, выполнена его адаптация к реальным условиям проектирования. Проведены расчеты, подтверждающие эффективность предложенной методики, обобщены результаты и сделаны выводы.

## Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.



# О превентивной оценке возникновения отказов и причинах их возникновения (на примере филиала ПАО «Россети Волги» – «Ульяновские распределительные сети») On a preventive assessment of failures and their causes. Case study of the Ulyanovsk Distribution Networks, a branch of Rosseti Volga, PJSC

Наумов И.В.<sup>1,2\*</sup>, Соболева А.Э.<sup>2</sup>  
Naumov I.V.<sup>1,2\*</sup>, Soboleva A.E.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Иркутский государственный аграрный университет, Иркутская область, пос. Молодежный, Российская Федерация,

<sup>2</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Российская Федерация

<sup>1</sup>Irkutsk State Agrarian University, Irkutsk Oblast, Molodezhny, Russian Federation,

<sup>2</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russian Federation

\*professornaumov@list.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4767-0127>, SPIN-код: 3954-3292, AuthorID: 168795.



Наумов И.В.



Соболева А.Э.

**Резюме.** Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью объективной оценки уровня технического состояния электрических сетей, как одного из действенных инструментариев, лежащих в основе разработки противоаварийных мероприятий. **Целью** статьи является анализ условий функционирования одного из филиалов ПАО «Россети Волги» – «Ульяновских распределительных сетей» при транспорте электрической энергии по всем структурным подразделениям этой компании. В соответствии с поставленными задачами дана объективная характеристика структурно-балансовых особенностей электрических сетей компании. **Методы.** В качестве основных методов исследования использовались общенаучные методы статистического и численного анализа, методы теории электрических цепей и теории прогнозирования. В качестве инструментария расчетов использовалось программное обеспечение Excel, MATLAB и пакеты авторских программ. Произведен анализ аварийной ситуации в сетях компании за длительный период наблюдения, установлены критерии оценки событий отказов в зависимости от величины недоотпуска электрической энергии. Проанализированы основные причины повреждаемости исследуемых электрических сетей за период 2018-2023 гг. и определено их процентное соотношение в общем количестве отказов за исследуемый интервал времени. Произведена превентивная оценка возникновения аварийных отказов на краткосрочную перспективу с учетом сезонной компоненты, учитывающей возможную флуктуацию отказов, обусловленную особенностями сочетаний климатических условий территорий, по которым осуществляется трассировка электрических сетей. Для визуализации расчетных данных анализа использованы технологии графических редакторов Excel и MATLAB. **Выводы.** Полученные результаты исследований могут быть интересны руководству компании «Ульяновские распределительные сети» в качестве отправного материала при разработке комплекса противоаварийных мероприятий. Также материал статьи может представлять интерес инженерным службам других электросетевых компаний и научным работникам, занимающимся исследованиями в области повышения уровня надежности электроснабжения.

**Abstract.** The relevance of the research topic is due to the need for objectively assessing the technical state of power grids as one of the effective tools used in drafting emergency response measures. The **Aim** of the paper is to analyse the operational condition of one of the branches of Rosseti Volga, PJSC, the Ulyanovsk Distribution Networks, in the process of transmission of electrical power throughout its business units. Given the task at hand, an objective description of the structure and balance of the company's power supply network was defined. **Methods.** As the main methods of research, the author used the general scientific methods of statistical and numerical analysis, the circuit and prediction theory. Excel, MATLAB and proprietary software packages were used as calculation tools. The author analysed emergency situations in the company's networks over a long period of observation, defined the criteria for assessing failures depending on the amount of undersupplied electrical power. The research analysed the main causes of damage to the examined power networks for the period between 2018 and 2023 and identified their share in the total number of failures for the above period. The occurrence of emergency outages in the short term was preventively

*assessed given the seasonality that takes into account the possible fluctuation of failures due to the particular combination of climate conditions of the territories where the electrical networks are situated. The calculated data was visualised using Excel and MATLAB. **Conclusions.** The paper's findings may be of interest to the management of the Ulyanovsk Distribution Networks as the foundation of a potential set of emergency measures. The article may be also of interest to engineering services of other power grid companies and researchers involved with improving the reliability of power supply.*

**Ключевые слова:** аварийные отключения, недоотпуск электроэнергии, электросетевое оборудование, причины повреждений, превентивная оценка, авторегрессионные модели, индекс сезонности.

**Keywords:** emergency shutdowns, undersupply of energy, power grid equipment, causes of damage, preventive assessment, autoregressive models, seasonality index.

**Для цитирования:** Наумов И.В., Соболева А.Э. О превентивной оценке возникновения отказов и причинах их возникновения (на примере филиала ПАО «Россети Волги» – «Ульяновские распределительные сети») // Надежность. 2025. №1. С. 28-37. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-1-28-37>

**For citation:** Naumov I.V., Soboleva A.E. On a preventive assessment of failures and their causes. Case study of the Ulyanovsk Distribution Networks, a branch of Rosseti Volga, PJSC. Dependability 2025;1:28-37. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-1-28-37>

**Поступила:** 27.08.2024 / **После доработки:** 09.12.2024 / **К печати:** 05.03.2025

**Received on:** 27.08.2024 / **Revised on:** 09.12.2024 / **For printing:** 05.03.2025

## Введение

Общий объем произведенной электрической энергии (ЭЭ) всеми электростанциями ЕЭС России в 2022 г. составил 1121,6 млрд кВт·ч, а объем электропотребления – 1106,3 млрд кВт·ч. По ПАО «Россети Волги» полезный отпуск ЭЭ в этом году составил 47,92 млрд кВт·ч [1]. И главной задачей электропередачи по электрическим сетям всех напряжений является сокращение количества аварийных ситуаций при транспорте ЭЭ.

Непрерывность обеспечения ЭЭ различных форм электропотребления является самой главной задачей электроэнергетической отрасли любого государства. В Российской Федерации в настоящее время текущее электропотребление, кроме всего прочего, ужесточается требованиями круглосуточной работы предприятий, обеспечивающих военные заказы, для достижения целей специальной военной операции. При этом состояние электросетевого оборудования распределительных электрических сетей, осуществляющих электропередачу потребителям, внушает серьезное опасение с точки зрения надежности его функционирования. По российским электрическим сетям в зависимости от территориальных и климатических условий электропередачи уровень износа достигает запредельных значений. Так, для сетей Кемеровской области (Новокузнецк) износ составляет 92%, сети «Тверьэнерго» – 75%, «Ярэнерго» – 70%, Белгородская область – 67%; Самарская – 56% [2, 3]. Кроме того, и срок эксплуатации электрических сетей имеет существенное значение. Например, доля оборудования и линий электропередачи (ЛЭП) со сверхнормативным сроком службы в сетях ПАО «Россети Волги» составляет: Самарские сети – 36,2% и 21,82%; сети «Чуваэнерго» – 60,08% и 40,84%; «Мордовэнерго» – 69,99% и 63,6%; «Пензаэнерго» – 79,4% и 49,9%; Ульяновские

сети – 70,9% и 59,67%; «Оренбургэнерго» – 71,27% и 72,94%; ПАО «Россети Московский регион» – 51,2% и 53,6%; сети Мурманской области – 81,51% и 59,36%; Свердловская – 72,8% и 54,4% и проч. [4]. Соответственно сказанному, вопрос повышения уровня надежности при транспорте ЭЭ по системам электропередачи занимает главенствующее положение в сложившемся положении вещей в структуре электроэнергетики России и обуславливает цель разработки всего комплекса противоаварийных мероприятий (ПАМ). Исходя из подходов рассмотрения проблемы, некоторыми авторами рекомендуется выделять пять классов достижения этой поставленной цели: концептуальные, информационные, нормативные, исследовательские, а также задачи анализа и синтеза [5]. При этом первые 3 из них не являются проблемными, поскольку обусловлены целью исследования и объемом исходных данных. Четвертый класс объединяет всю систему применяемых существующих методов, алгоритмов и программного обеспечения для их успешного использования при аналитическом обзоре собранной информации. Наконец, последняя составляющая, представляющая квинтэссенцию произведенного анализа, синтезируется в виде результата, использование которого в той или иной степени позволяет достичь поставленной цели. Одним из таких результатов может служить получение данных прогнозных значений по аварийным ситуациям в исследуемых электрических сетях, на основе которых разрабатываются конкретные ПАМ, успешная реализация которых позволяет предотвратить или сократить отказы оборудования по определенным причинам, помочь в планировании и прогнозировании бюджета компании, а также формировании комплектов запасных частей.

В настоящее время наиболее используемыми инструментами прогнозирования количества аварийных от-

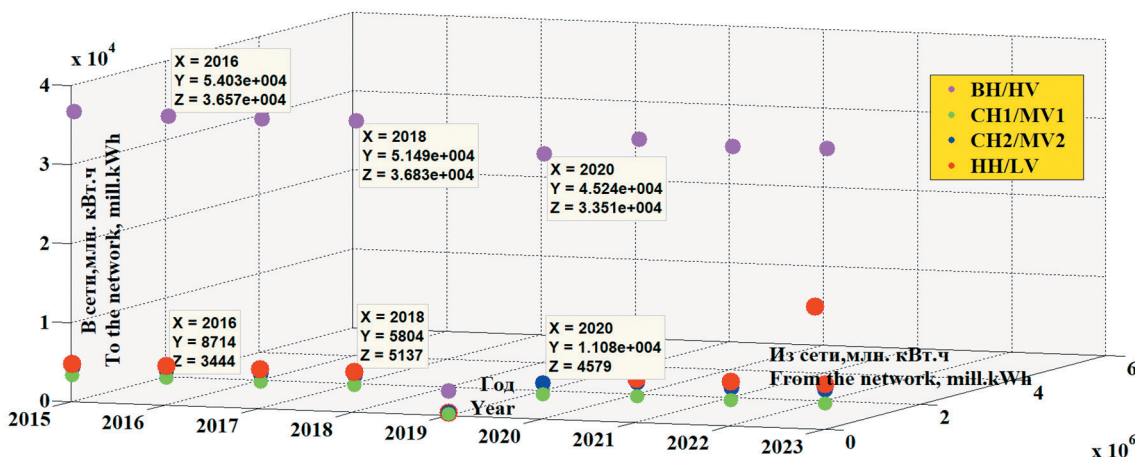


Рис. 1. Передача электрической энергии в сети и из сетей компании УлРС

ключений (АО) (отказов) в электрических сетях являются методы, основанные на интерполяции временных рядов выборки данных, математическом ожидании отказов и на авторегрессионных трендовых моделях изменения прогнозируемой величины. Основу данных методов составляет аналитическая оценка предшествующего ряда данных выборки по АО объекта исследования и расширение полученных тенденций для создания прогнозных характеристик исследуемого показателя на определенную перспективу. Безусловно, учесть влияние всех возможных факторов для получения превентивной оценки АО в электрических сетях невозможно, поскольку флуктуация отдельных значений ряда выборки данных порою носит непредсказуемый характер. Особенно это свойственно тем территориям, где в течение суток могут происходить резкие изменения климатических характеристик: температуры, влажности, атмосферных явлений.

Тем не менее, современные технологии прогнозирования позволяют получить максимально приближенные к действительности данные по превентивным отказам в электрических сетях исследуемых объектов.

Целью статьи является получение превентивных значений отказов в исследуемых электрических сетях на основе использования технологии статистических методов прогнозирования по классификационным признакам причин возникновения этих отказов. Для достижения указанной цели поставлен ряд следующих задач: *характеристики объекта исследования, численный анализ аварийных отказов в электрических сетях и классификация полученных количественных показателей по причинам их возникновения, превентивная оценка и получение прогнозных значений отказов по установленным причинам с учетом сезонной составляющей.*

**Характеристика компании.** 30 июля 1958 г. Совнархозом Ульяновского экономического района было принято решение о создании Ульяновской энергосистемы [6], а с 1 апреля 2008 г. Ульяновские распределительные сети (далее по тексту – УлРС) вошли в качестве одного из 7 филиалов в состав ПАО «Россети Волги». В настоящее время УлРС обеспечивают ЭЭ население Ульяновской области в количестве 1191,7 тыс. человек на площади

37,3 тыс. км<sup>2</sup> [1]. Предприятия компании, включающие 4 производственных объединения в составе 21 РЭС<sup>1</sup>, имеют на балансе 171 подстанцию (ПС) напряжением 110/35 кВ и 5337 ПС 6-10/0,4 кВ. Общая протяженность ЛЭП всех напряжений составляет 22,5 тыс. км [6].

Балансовая характеристика по передаче ЭЭ в сети и из сетей компании за период 2015-2023 гг. представлена на рис. 1. Анализ рис. 1 показывает, что общий объем переданной ЭЭ в сети УлРС за период 2015-2023 гг. составил 6422651,789 тыс. кВт·ч. Из них по сетям ВН – 64,27%; СН1 – 10,9%; СН2 – 17,05%; НН – 7,8%<sup>2</sup>. Из сетей УлРС передано потребителям за этот же период всего 397210,947 тыс. кВт·ч, из них на долю сетей ВН – 73 %; СН1 – 6,77 %; СН2 – 9,55 %; НН – 10,67% [7]. Уровень потерь ЭЭ при передаче составил 6,48% [8].

## 1. Результаты и обсуждение

**Аварийность электропередачи в УлРС.** По опубликованным данным доля электрооборудования и ЛЭП УлРС со сверхнормативным сроком эксплуатации находится на втором месте из 7 филиалов ПАО «Россети Волги» и составляет 70,9% и 59,67%, соответственно [4].

На основании данных, опубликованных в открытой печати [19], произведена оценка АО в сетях компании УлРС за 2015-2023 гг. Количественная характеристика и последствия отказов представлены в табл. 1, а динамика изменения отказов по месяцам исследуемого периода показана на рис. 2.

Анализ данных табл. 1 и рис. 2 показывает, что за исследуемый период времени процентное соотношение количества отказов по годам от общего количества отказов (10772) выглядит следующим образом: 2015 – 7,8%; 2016 – 7,08%; 2017 – 7,15%; 2018 – 13,06%; 2019 – 13,48%; 2020 – 13,12%; 2021 – 12,54%; 2022 – 12,77% и 2023 – 12,98%. Как видно, наибольшее количество АО произошло в 2019 г., а наименьшее – в 2016 г. При этом

<sup>1</sup> РЭС – предприятие районных электрических сетей

<sup>2</sup> ВН – сети высокого напряжения (110 кВ и выше); СН1 – сети среднего напряжения (35 кВ); СН2 – сети среднего напряжения (6-35 кВ); НН – сети низкого напряжения (0,4 кВ)



Табл. 1. Количество АО и величина недоотпуска ЭЭ в сетях УлРС за период 2015-2023 гг.

| Количество отказов, шт. /Величина недоотпуска ЭЭ, тыс.кВт.ч. |             |             |            |             |             |             |             |             |             |
|--------------------------------------------------------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Год /Месяц                                                   | 2015        | 2016        | 2017       | 2018        | 2019        | 2020        | 2021        | 2022        | 2023        |
| Январь                                                       | 27/8,4938   | 28/8,0560   | 25/7,3082  | 197/7,8567  | 33/6,6169   | 64/5,2148   | 71/15,2454  | 63/5,8307   | 91/24,2902  |
| Февраль                                                      | 40/9,8344   | 36/9,3750   | 35/8,8447  | 173/8,3877  | 122/7,5393  | 118/12,8458 | 89/10,4464  | 155/34,5842 | 36/3,5351   |
| Март                                                         | 61/25,8594  | 55/23,6420  | 55/20,9276 | 81/19,7901  | 84/19,1591  | 126/13,4053 | 75/7,5215   | 145/18,7750 | 95/7,3435   |
| Апрель                                                       | 64/28,0979  | 62/26,6710  | 48/24,1360 | 122/24,2261 | 81/21,9195  | 181/32,7857 | 131/11,0056 | 84/28,3041  | 194/16,4304 |
| Май                                                          | 82/21,2472  | 77/19,3120  | 74/28,7813 | 186/25,7993 | 128/27,9336 | 153/16,7817 | 136/11,8927 | 90/9,1317   | 103/39,5334 |
| Июнь                                                         | 62/18,0922  | 61/16,4790  | 69/8,7880  | 113/15,9425 | 129/13,4953 | 87/8,6149   | 155/17,9141 | 104/15,2129 | 99/6,8074   |
| Июль                                                         | 107/30,1380 | 100/26,6140 | 99/71,9039 | 92/9,5323   | 163/29,2663 | 181/32,7857 | 148/27,1208 | 182/34,3375 | 228/32,9084 |
| Август                                                       | 91/29,8965  | 88/26,3860  | 80/7,3120  | 124/65,3634 | 192/25,4615 | 153/16,7817 | 116/14,9660 | 84/12,5453  | 92/9,8133   |
| Сентябрь                                                     | 86/19,9593  | 81/17,6270  | 79/6,0956  | 93/14,6407  | 148/18,0930 | 87/8,6149   | 105/15,7235 | 91/9,7575   | 56/6,6749   |
| Октябрь                                                      | 68/13,2922  | 57/12,1970  | 62/10,0001 | 77/9,6103   | 137/25,4164 | 100/16,1250 | 89/14,0074  | 70/30,7215  | 143/44,7001 |
| Ноябрь                                                       | 70/28,9788  | 89/26,0350  | 63/21,0110 | 69/15,3739  | 105/16,3220 | 78/14,0742  | 102/16,6036 | 186/88,9811 | 80/10,5269  |
| Декабрь                                                      | 83/32,5075  | 29/29,7030  | 81/22,0447 | 80/18,2937  | 131/12,6120 | 85/18,0562  | 134/21,8208 | 121/28,1608 | 182/21,3781 |

недоотпуск ЭЭ в результате перерывов электроснабжения из общего объема недопоставленной ЭЭ (2124,9366 тыс. кВт·ч) по этим же годам выглядит следующим образом: 2015 – 12,55%; 2016 – 12,39%; 2017 – 11,16 %; 2018 – 11,05%; 2019 – 10,54%; 2020 – 9,23%; 2021 – 8,67%; 2022 – 14,89% и 2023 – 10,54%. Таким образом, даже увеличение количества отказов начиная с 2018 г. не привело к увеличению недоотпуска и, даже наоборот, с каждым годом происходит снижение количества недоотпущенной ЭЭ до 2022 г. – в среднем на 5,9% ежегодно. Но в 2022 г. произошло резкое возрастание величины недоотпуска – на 41,8%, а затем, в 2023 г. – вновь недоотпуск ЭЭ снижается.

**О причинах повреждений и интенсивности возникших отказов.** Следует отметить, что основной характеристикой последствий любых АО является величина недоотпуска ЭЭ, которая зависит от продолжительности перерыва электроснабжения (ЭС), связанной со степенью серьезности произошедшей аварии и продолжительностью ее устранения. Анализ произведем за прошедшие 6 лет – с 2018 по 2023 гг.

На рис. 3 представлены диаграммы интенсивности отказов в соответствии с принятой классификацией за период 2018-2023 гг.

В материалах исследований, опубликованных в [10, 11] предлагается оценивать интенсивность аварийных ситуаций по следующим признакам: а) отказы, не повлекшие перерыва ЭС, то есть те отказы, после которых при срабатывании системы автоматического повторного включения (АПВ) напряжение электропитания восстанавливается –  $N_{АПВ}$ ; б) повлекшие перерыв ЭС с недоотпуском ЭЭ до 1 тыс. кВт·ч ( $N_{<1}$ ); в) повлекшие перерыв ЭС при недоотпуске ЭЭ от 1 тыс. кВт·ч до 9,99 тыс. кВт·ч ( $N_{<10}$ ); г) повлекшие перерыв ЭС с недоотпуском от 10 и более тыс. кВт·ч ( $N_{>10}$ ).

Проведенный анализ рис. 3 показал следующее.

Из общего количества отказов за период 2018-2023 гг., равного 8398 шт. на отказы, перерыв в результате которых привел к недоотпуску ЭЭ менее 1 тыс. кВт·ч приходится «львиная» доля – 92,24% (7746 шт.). При этом количество таких отказов распределилось по годам наблюдения примерно равномерно – по 17% (рис. 3, а).

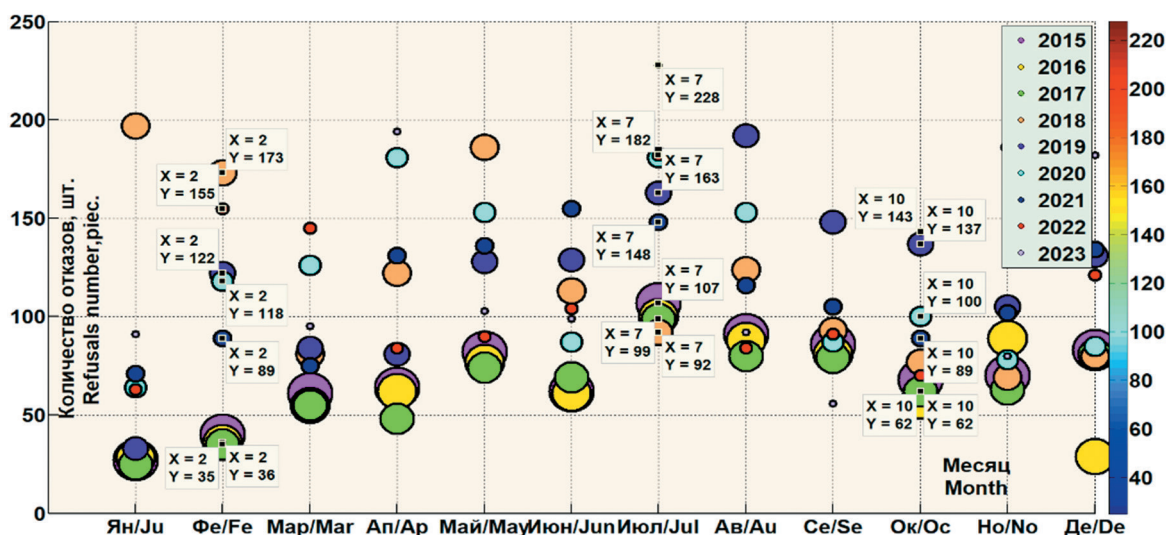


Рис. 2. Изменение количества отказов в электрических сетях УлРС по месяцам года



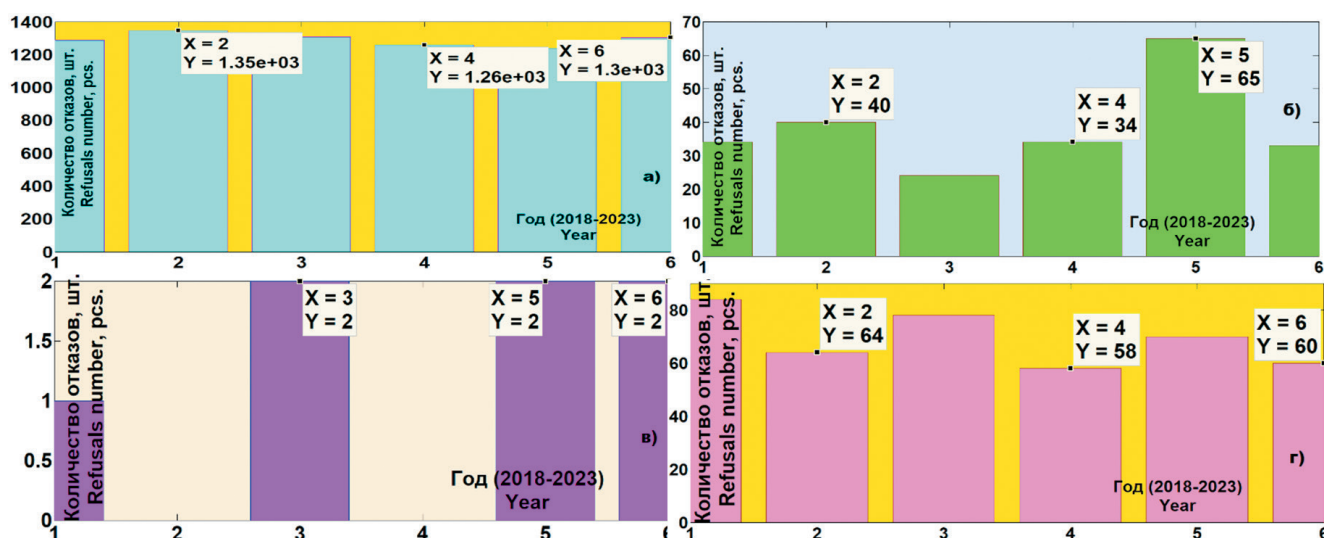


Рис. 3. Диаграммы изменения интенсивности отказов в электрических сетях УлРС за период 2018-2023 гг:

 а)  $N_{<1}$  – отказы; б)  $N_{>1}$  – отказы; в)  $N_{<10}$  – отказы; г)  $N_{\text{АПВ}}$  – отказы

Количество отказов, перерыв которых вызвал недоотпуск ЭЭ в пределах от 1 до 10 тыс. кВт·ч составило 2,74% (230 отказов – рис. 3, б). При этом их наибольшее количество соответствует именно 2022 г. (28% от всего количества  $N_{>1}$ ). Отказы, в результате которых недоотпуск ЭЭ составил более 10 тыс. кВт·ч составили всего 0,083% всех отказов (7 отказов – рис. 3, в). При этом в 2019 и в 2021 гг. таких отказов не наблюдалось. Тем не менее, несмотря на небольшое количество отказов этой категории, их интенсивность достаточно высока: общий недоотпуск ЭЭ только от 7 отказов за 6 лет составил 123,2 тыс. кВт·ч (8,93% всего количества ЭЭ, недоотпущенной за эти годы – 1379,2894 тыс. кВт·ч.). Кроме того, как было показано выше, в 2022 г. произошел самый большой недоотпуск ЭЭ – на этот год приходится 34,5 тыс. кВт·ч отказов  $N_{<1}$ -типа (10,9% всего недоотпуска ЭЭ в этом году – 316,3423 тыс. кВт·ч.). Последнюю группу составляют самовосстанавливающиеся отказы ( $N_{\text{АПВ}}$  – рис. 3, г). На их долю приходится 4,93% (414 отказов). Как правило, такие отказы возникают вследствие схлеста проводов при сильных порывах ветра.

В соответствии с [12] за этот же период (2018-2023 гг.) произведен анализ причин, по которым произошло возникновение указанных аварийных отключений. Установлено, что основными группами причин явились следующие: **1** – причины, обусловленные износом основного электросетевого оборудования, приводящего к его неудовлетворительному техническому состоянию (старение изоляции, потеря механической прочности провода, изменение свойств материалов и т.д.); **2** – случайные события (наброс посторонних предметов на воздушные линии, проезд крупногабаритной техники, воздействие животных и птиц и прочие), вызвавшие внешнее механическое воздействие, в результате которого могут произойти: обрыв, разрушение контакта, электродуговое повреждение и проч.; **3** – повреждения в электрических сетях потребителя, носящие различный

характер; **4** – группа причин, связанных со стихийными явлениями (гроза, атмосферные перенапряжения, непрекращающиеся порывы ветра) приводящие к внешнему воздействию на элементы электрических сетей и электроустановок; и **5** – группа причин, связанных с недостатками конструкции электроустановок, дефектами, а также неустановленные причины.

Как показал анализ, за период 2018-2023 гг. всего произошло 8306 аварийных события (табл. 2). При этом наибольшее количество (68,64%) произошло по *первой* группе причин. Из общего количества отказов по этой причине (5701 шт.) в 2018 и 2019 гг. произошло 20,8% и 21% отказов, соответственно. В последующие годы отказы по этой причине распределились следующим образом: 2020 – 15,2%; 2021 – 15,96%; 2022 – 13,16%; 2023 – 13,86%. При этом наиболее «повреждаемыми» месяцами года по этим причинам является весенне-летний период (апрель, май, июнь, июль и август). Усредненное количество повреждений, приходящихся на долю каждого месяца для этого периода, составляет 9,34% (в среднем по 532 отказа). Общее снижение отказов по этой причине свидетельствует о том, что руководство компании уделяет значительное внимание проведению запланированных ПАМ, что выражается в своевременной замене изношенных конструктивных частей элементов электрических сетей, а также производства реконструкционных работ, связанных с перетяжкой проводов воздушных ЛЭП, регулированием стрел провеса, а также выравнивания опор ЛЭП.

*Второй* по значимости группой являются причины, связанные со случайными событиями. На долю этих причин приходится 21,88% всех отказов (1817 событий). При этом менее всего таких отказов приходилось на 2018 г. – 3,1% (56 отказов), а более всего – на 2023 г. – 25,1% (456 шт.). Наибольшее количество повреждений по этой причине происходило в *июле* месяце (12,88% – 234 отказа), наименьшее – в *январе* (4,5% – 82 отказа).

Табл. 2. Динамика изменения количества отказов по причинам за 2018-2023 гг. по месяцам года

| Год  | Распределение отказов по месяцам года по причинам (1-я, 2-я, 3-я, 4-я, 5-я) |                   |                   |                    |                    |                    |                   |                   |                   |                   |                   |                   |
|------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|      | Янв                                                                         | Фев               | Мар               | Апр                | Май                | Июн                | Июл               | Авг               | Сен               | Окт               | Ноя               | Дек               |
| 2018 | 192,1,1,<br>0, 2                                                            | 146,1,0,<br>26, 1 | 76,3,1,<br>0, 0   | 118,7,1,<br>3, 1   | 127,3,1,<br>45, 1  | 81,8,1,<br>19, 1   | 84,6,2,<br>23, 2  | 67,8,1,<br>4,0    | 89,7,3,<br>0, 0   | 66,4,3,<br>0, 1   | 65,3,1,<br>0, 0   | 74,5,0,<br>0, 0   |
| 2019 | 26,4,0,<br>2, 0                                                             | 105,4,0,<br>17, 0 | 63,4,1,<br>15, 0  | 73,6,2,<br>0, 0    | 108,12,4,<br>14, 0 | 99,11,1,<br>5, 0   | 141,15,0,<br>6, 0 | 171,20,1,<br>2, 1 | 137,25,2,<br>0, 0 | 96,37,2,<br>0, 0  | 72,34,1,<br>0,0   | 107,21,0,<br>0, 0 |
| 2020 | 48,9,3,<br>0, 0                                                             | 89,28,1,<br>2, 2  | 85,35,0,<br>4, 1  | 48,9,3,<br>0, 0    | 89,28,1,<br>2, 2   | 85,35,0,<br>4, 1   | 96,65,1,<br>28, 2 | 86,55,5,<br>2, 1  | 60,25,0,<br>0, 0  | 65,37,1,<br>0, 0  | 58,18,1,<br>5,0   | 59,26,0,<br>0, 1  |
| 2021 | 52,23,2,<br>2, 2                                                            | 68,19,0,<br>13, 0 | 46,25,0,<br>0, 0  | 105,30,0,<br>0, 0  | 100,32,2,<br>2, 0  | 109,20,2,<br>50, 1 | 96,28,1,<br>24, 6 | 80,23,5,<br>1, 2  | 67,32,3,<br>0, 0  | 59,31,2,<br>0, 0  | 75,22,3,<br>0, 0  | 53,36,0,<br>47, 1 |
| 2022 | 42,21,0,<br>0, 2                                                            | 43,52,3,<br>7, 0  | 80,57,1,<br>17, 0 | 46,29,4,<br>3, 1   | 62,34,4,<br>0, 0   | 61,34,7,<br>4, 1   | 118,41,3,<br>15,2 | 56,27,5,<br>0, 0  | 53,29,6,<br>0, 1  | 27,20,10,<br>2, 1 | 96,48,9,<br>42, 2 | 66,29,5,<br>10, 3 |
| 2023 | 57,24,3,<br>0, 3                                                            | 23,15,0,<br>0, 0  | 63,32,0,<br>0, 0  | 130,51,2,<br>13, 0 | 49,46,1,<br>11, 1  | 65,28,1,<br>5, 0   | 71,79,3,<br>72, 2 | 40,47,2,<br>1, 0  | 31,20,3,<br>0, 1  | 81,51,1,<br>6, 6  | 45,26,3,<br>0, 2  | 135,37,6,<br>1, 5 |

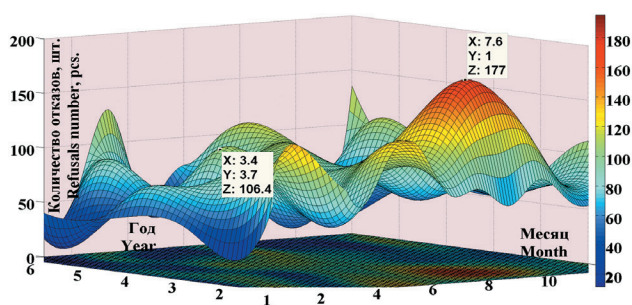


Рис. 4. Изменение интерполированного количества отказов по 1-й причине в УРС за 2018-2023 гг.

Количество отказов, произошедших по остальным причинам, распределено следующим образом. Отказы, связанные со стихийными событиями (4 группа причин), находятся на *третьем* месте – 6,93% (576 отказов); на *четвертом* месте – третья группа причин (отказы в электрических сетях потребителя) составляет 1,77% (147 отказов) и последнее, *пятое* место занимают причины, связанные с дефектами изготовления и монтажа (либо неустановленные причины) – 0,78% (65 отказов).

Таким образом, наибольшая повреждаемость исследуемых электрических сетей связана со старением и износом основного электросетевого оборудования.

**Прогнозирование отказов с учетом сезонной составляющей.** Прогнозирование уровня надежности обеспечения электроэнергией во многом снижает риски перерывов электроснабжения и, соответственно, способствует не только повышению эффективности использования ЭЭ, но также и сохранности элементов электрических сетей и основного электрооборудования. Это становится возможным вследствие проведения соответствующих превентивных мероприятий, разработанных на основе данных прогностического анализа функционирования электрических исследуемых сетей.

В основе методов вероятностного анализа электроэнергетических задач лежат достаточно глубоко проработанные и сформированные преобразования систем случайных величин. В результате расчеты режимов работы технических систем с учетом вероятностной

природы их параметров зачастую сводятся к детерминированным расчетам, например, в качестве исходных данных рассматриваются средние значения наблюдаемых величин.

Для выбора оптимального метода прогнозирования на первоначальном этапе следует определить, насколько прогнозируемые параметры отказов в ряде выборки данных могут коррелировать по своим значениям с изменяющимися условиями электропередачи каждого месяца из года в год. При этом определение коэффициента автокорреляции, позволяющего учитывать сдвиг по времени, что положительным образом сказывается на точности и качестве статистической модели, должно производиться для достаточно существенного количества данных. В нашем случае имеются ряды данных для каждого месяца, состоящие из 6 значений. Для поиска промежуточных значений каждого ряда и определения коэффициента автокорреляции, воспользуемся программой “Interpolation”<sup>1</sup>. Особенностью данной программы является возможность не только визуализации всей трехплоскостной матрицы интерполированных данных, но и нахождения по ней (нижняя плоскость рис. 4) любого количества отказов, соответствующих минимальному, среднему, либо максимальному значениям (цветовая гамма: синий, зеленый и красный цвета, соответственно). При шаге интерполяции, равном 10, матрица данных отказов (6x12), соответствующая табл. 2, преобразуется в матрицу данных 60x120, визуализация которой представлена на рис. 4. Для выявления зависимости между значениями выборки или опровержении этой гипотезы применяют коэффициент автокорреляции (Kt).

На основании полученных интерполированных данных, с использованием технологий Excel, определим коэффициенты Kt для каждой полученной выборки интерполированных данных по месяцам для 1 группы

<sup>1</sup> Программа позволяет осуществлять, линейную, билинейную и бикубическую интерполяции. В настоящее время находится на рассмотрении для получения государственной регистрации

причин. Так, численные значения коэффициентов  $K_t$  для 12 рядов выборки с января по декабрь составили соответственно: 0,99159; 0,999607; 0,968158; 0,964626; 0,991399; 0,9941; 0,972428; 0,982284; 0,98973; 0,992444; 0,984783; 0,978366. Как видно, для каждого из месяцев коэффициент  $K_t$  превышает значение 0,7, что позволяет использовать технологию авторегрессионного анализа для получения прогнозного количества отказов в 2024 г. [13]. При поиске определенных закономерностей в статистической информации при синтезировании прогностической оценки отказов, очень важно правильно представить гипотезу о временной разверстке прогнозируемого параметра, что безусловно связано с определением наличия тренда и его типа, то есть определением наличия периодичности в выборке данных [14]. Поэтому оценку повреждаемости сетей можно производить на основе анализа линейных и нелинейных трендовых зависимостей.

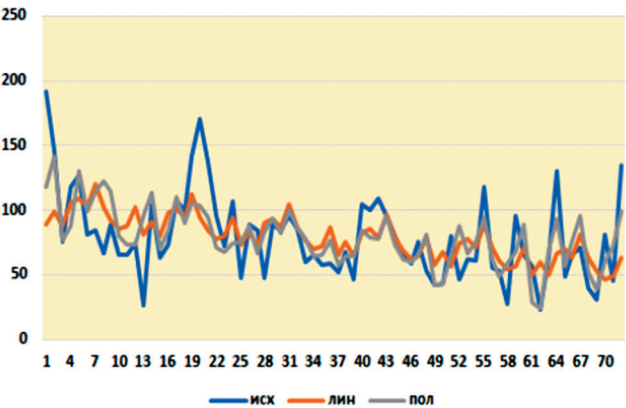


Рис. 5. Диаграммы изменения потока отказов по 1-группе причин за 2018-2023 гг.

При этом моделью тренда принято называть регрессионное уравнение, в котором зависимой переменной выступает исследуемый показатель, а независимой – либо время, либо номер наблюдения исследуемого показателя. Поэтому весьма важным представляется точное определение зависимости, по которой происходит изменение прогнозируемого показателя. В качестве примера, представленного на рис. 5, для первой группы причин отказов построим диаграмму изменения отказов для исходного ряда и сравним ее с диаграммами линейного и полиномиального изменения этих отказов. Как видно из рис. 5, исходный ряд данных имеет значительные флуктуации от среднего значения и в данном случае наибольшей корреляцией обладает диаграмма отказов, соответствующая линейной зависимости. Таким образом, становится понятным, что выбор наиболее верной зависимости изменения потока отказов является существенным фактором при определении прогнозного значения потока отказов. На основании использования технологий Excel, произведем статистическую обработку полученных рядов интерполированных данных отказов по всем месяцам года.

На рис. 6 представлены результаты авторегрессионного анализа по 1 группе причин отказов для января месяца 2024 г. В соответствии с полученным уравнением тренда, при подстановке в него значения количества отказов для последнего года наблюдения (2023), равного 57, получим превентивное количества отказов по этой причине в январе 2024 г., равное 61. Аналогично получим уравнения трендов и соответствующие прогнозные значения отказов по данной причине для остальных месяцев 2024 г. (табл. 3).

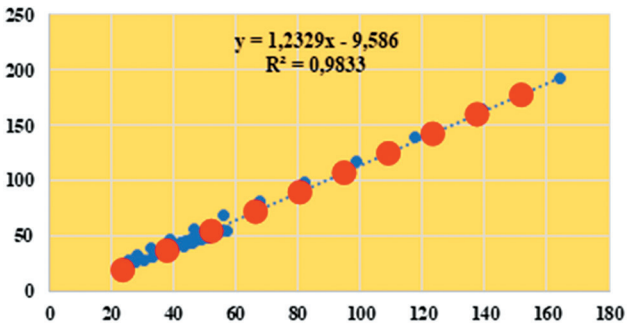


Рис. 6. Авторегрессионная модель и уравнение тренда для получения прогнозного значения количества отказов в УЛРС по 1-й причине в январе 2024 г.

Табл. 3. Результаты авторегрессионного анализа при получении прогнозных моделей возникновения отказов в УЛРС по 1-причине в 2024 г.

| Месяц    | Уравнение тренда                                      | Прогнозное количество отказов, шт. |
|----------|-------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Январь   | $y = 1,2329x - 9,586$<br>$R^2 = 0,9833$               | 61                                 |
| Февраль  | $y = 1,0205x + 0,6458$<br>$R^2 = 0,9992$              | 24                                 |
| Март     | $y = 0,9581x + 3,4105$<br>$R^2 = 0,9373$              | 64                                 |
| Апрель   | $y = -0,0047x^2 + 1,635x - 20,024$<br>$R^2 = 0,9416$  | 113                                |
| Май      | $y = 1,019x - 0,6229$<br>$R^2 = 0,9829$               | 49                                 |
| Июнь     | $y = -0,0029x^2 + 1,3938x - 10,443$<br>$R^2 = 0,9904$ | 68                                 |
| Июль     | $y = 0,0022x^2 + 0,5226x + 25,859$<br>$R^2 = 0,9465$  | 66                                 |
| Август   | $y = 0,0013x^2 + 0,6699x + 20,026$<br>$R^2 = 0,9659$  | 49                                 |
| Сентябрь | $y = 0,9756x + 2,914$<br>$R^2 = 0,9796$               | 33                                 |
| Октябрь  | $y = -0,0011x^2 + 1,1789x - 5,3175$<br>$R^2 = 0,9856$ | 83                                 |
| Ноябрь   | $y = 0,9786x + 1,0972$<br>$R^2 = 0,9698$              | 45                                 |
| Декабрь  | $y = 0,0039x^2 + 0,3194x + 28,375$<br>$R^2 = 0,9616$  | 143                                |



Вместе с этим полученные значения возможного количества отказов, представленные в табл. 3, не учитывают действие сезонной составляющей. Как правило, в модель прогноза предпочтительнее вводить параметр сезонности, который учитывает особенности трех сезонов: лето, зима и весна-осень. И такой параметр вносит корректировку в анализ временных рядов. Аддитивная модель сезонности обычно представляется тремя слагаемыми, представленные: трендом, сезонностью и случайной компонентой [14].

С учетом сказанного, с помощью технологий программы «Оракул», созданной И.В. Мокрым [15], произведем превентивную оценку повреждений с учетом сезонной составляющей. Поскольку полученные уравнения тренда для каждого месяца 2024 г. носят не только линейный, но и полиномиальный характер (50% x 50%), рассмотрим создание прогнозных моделей для этих двух характеров изменения прогнозируемого количества отказов. Следует отметить, что и линейная, и полиномиальная модели прогнозируемых отказов требуют сочетания как программы «Оракул», так и технологий Excel.

На рис. 7 представлены диаграммы изменения индексов сезонности для линейной и полиномиальной моделей изменения прогнозируемого количества аварийных отключений.

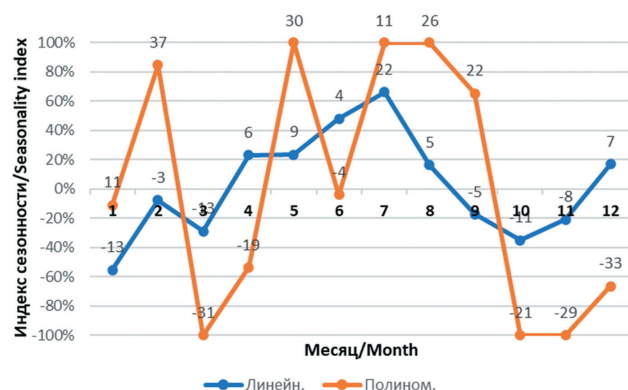


Рис. 7. Индексы сезонности аварийных отключений по 1-й группе причин для линейной и полиномиальной изменений в электрических сетях УлРС за 2018-2023 гг.

На основании произведенных расчетов установлено, что изменения индекса сезонности для полиномиальной модели вряд ли может соответствовать

реальной картине электропередачи ввиду слишком резких колебаний. Например, для марта, октября и ноября 2024 г. индекс сезонности показывает скачкообразное снижение количества аварийных отключений, что не совсем характерно для исследуемых сетей компании в это время года. Поэтому более правдоподобным выглядит изменение сезонной компоненты для линейного характера изменения прогнозируемого количества отказов.

На основании произведенных расчетов получены прогностические значения количества отказов без учета и с учетом индекса сезонности (табл. 4).

Аналогичные данные можно получить и для отказов в сетях компании по другим установленным причинам. Анализ табл. 4 отчетливо показывает, что превентивная оценка возможных состояний исследуемого объекта должна обязательно учитывать влияние сезонной составляющей при формировании прогноза. Так для *линейной* модели, принятой за основу, индекс сезонности свидетельствует о значительном увеличении количества аварийных отключений по всем месяцам года (за исключением *сентября* и *декабря* месяцев).

Вероятность сходимости полученных прогнозных характеристик функционирования сетей компании УлРС с реальными значениями отказов может быть установлена только после сравнения полученных данных с отчетными данными отказов по итогам работы компании за 2024 г.

## 2. В качестве обсуждения

Систематический анализ деятельности электросетевых компаний, производимый на основании опубликованных данных, позволяет отслеживать реальные процессы электропередачи в соответствии с объективными условиями функционирования конкретных электрических сетей. Выводы, полученные автором, являются его субъективной оценкой. Вместе с этим основной мотивацией авторского анализа является желание поделиться своим мнением о состоянии действующих электрических сетей Российской Федерации, что дает возможность заинтересованным лицам сделать выводы и использовать полученные данные для повышения уровня надежности электроснабжения в конкретных структурных подразделениях электроэнергетических систем России.

Табл. 4. Прогнозируемое количество аварийных отключений по месяцам 2024 г. в УлРС

| Метод расчета                                               | Распределение прогнозируемых отказов по месяцам |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                                                             | Янв                                             | Фев | Мар | Апр | Май | Июн | Июл | Авг | Сен | Окт | Ноя | Дек |
| Уравнения авторегрессии без учета сезонной компоненты       | 61                                              | 24  | 64  | 113 | 49  | 68  | 66  | 49  | 33  | 83  | 45  | 143 |
| Использование технологии «Оракул» для линейной модели       | 97                                              | 106 | 96  | 114 | 116 | 110 | 128 | 110 | 10  | 93  | 96  | 110 |
| Использование технологии «Оракул» для полиномиальной модели | 81                                              | 111 | 26  | 36  | 95  | 56  | 72  | 91  | 86  | 41  | 33  | 29  |

### 3. Выводы

Подводя итог рассмотрению функциональной деятельности компании УЛРС по транспорту электрической энергии при передаче ее потребителям, на основании произведенного анализа можно сделать следующие выводы.

1. Доля оборудования и ЛЭП компании со сверхнормативным сроком эксплуатации составляет соответственно: 70,9% и 59,67%. Такая ситуация привела к тому, что основной причиной аварийных отключений в сетях компании является износ основного электросетевого оборудования (почти 70% всех отказов). Кроме того, эта причина обусловлена не только неудовлетворительным техническим состоянием оборудования, но отчасти и тем, что не всегда происходит своевременное выявление и устранение дефектов. Тем не менее, снижение количества отказов по этой причине с 2018 к 2023 г. от общего объема отказов свидетельствует о внимании руководства компании к проведению запланированных ПАМ.

2. Произведенная превентивная оценка возможных аварийных отключений по указанной причине показала хоть и незначительное, но все же увеличение количества аварийных отключений, что требует особого внимания руководства компании при разработке комплекса противоаварийных мероприятий.

3. Доказана эффективность учета сезонной компоненты при определении прогнозного количества возможных аварийных составляющих, при этом большое значение имеет правильная оценка зависимости изменения трендовой модели прогнозируемого количества отказов.

#### Направление дальнейших исследований

В настоящее время продолжается систематическая исследовательская работа по анализу уровня надежности электропередачи в различных структурных подразделениях ПАО «Россети».

**Благодарности.** Автор благодарит руководство филиала ПАО «Россети Волги» – «Ульяновские распределительные сети» за предоставленные материалы, которые легли в основу анализа деятельности этой компании за указанный период. Кроме того, автор выражает признательность и благодарность доценту кафедры «Информатики и математического моделирования» ИрГАУ Полковской М.Н. за консультации по превентивной оценке повреждаемости исследуемых электрических сетей.

### Библиографический список

1. Годовой отчет публичного акционерного общества «Россети Волга» за 2022 г. URL: [https://www.rossetivolga.ru/i/files/2023/7/4/go\\_oseti\\_volga\\_2022.pdf](https://www.rossetivolga.ru/i/files/2023/7/4/go_oseti_volga_2022.pdf) (дата обращения: 04.03.2024).
2. Износ электросетевой структуры в России. Масштабы и перспективы. URL: <https://regnum.ru/article/2348996> (дата обращения: 31.03.2024).
3. Наумов И.В. Прогностическая оценка функционального состояния электрических сетей (на примере филиала ПАО «Россети Волги» – «Самарские распределительные

сети») // Журн. Сиб. федер. ун-та «Техника и технологии». 2024. № 1(17). С. 92–106.

4. ЭнергоНьюс. Проблема старения электросетевого комплекса России. URL: <https://energo-news.ru/archives/161370> (дата обращения: 31.03.2024).

5. Надежность систем энергетики и их оборудования: в 4-х т. Т.1: Справочник по общим моделям анализа и синтеза надежности систем энергетики / Под общей ред. Ю.Н. Руденко. М.: Энергоатомиздат, 1994. 474 с.

6. Ульяновские распределительные сети отмечают 60-летний юбилей. URL: <https://ulpressa.ru/2018/07/30/%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%8F%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5-%D1%80%D0%B0%D1%81%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%B%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B5-%D1%81%D0%B5%D1%82%D0%B8/> (дата обращения: 05.04.2024).

7. ПАО «Россети Волга». П. 19 Г. Об основных потребительских характеристиках регулируемых товаров, работ и услуг. URL: [https://www.rossetivolga.ru/ru/klientam/standart\\_raskritiya\\_informatsii\\_subektami\\_optovogo\\_i\\_roznichnogo\\_rinkov\\_elektricheskoy\\_energii/2022god/p19gobosno/](https://www.rossetivolga.ru/ru/klientam/standart_raskritiya_informatsii_subektami_optovogo_i_roznichnogo_rinkov_elektricheskoy_energii/2022god/p19gobosno/) (дата обращения: 08.03.2024).

8. Энергетики «Ульяновских сетей»... URL: <https://www.allgen.ru/press/news/show/5442> (дата обращения: 04.03.2024).

9. Информация об основных потребительских характеристиках регулируемых товаров (работ, услуг). О техническом состоянии сетей. URL: [https://www.rossetivolga.ru/ru/klientam/standart\\_raskritiya\\_informatsii\\_subektami\\_optovogo\\_i\\_roznichnogo\\_rinkov\\_elektricheskoy\\_energii/2018...2023\\_god/p11binform/](https://www.rossetivolga.ru/ru/klientam/standart_raskritiya_informatsii_subektami_optovogo_i_roznichnogo_rinkov_elektricheskoy_energii/2018...2023_god/p11binform/) (дата обращения: 13.03.2024).

10. Наумов И.В. Проблемы аварийности электропередачи на примере компании ОАО «Омскэнергосбыт» // Надежность и безопасность энергетики. 2023. № 3(16). С. 133–142.

11. Наумов И.В. Оценка уровня надежности транспорта электрической энергии (на примере АО «Россети Сибирь Тываэнерго») // Надежность и безопасность энергетики. 2023. № 2(16). С. 64–72.

12. Приказ Минэнерго России от 06.02.2017 г. № 74 «О внесении изменений в некоторые нормативные правовые акты Министерства энергетики Российской Федерации по вопросам расследования причин аварий в электроэнергетике» (Зарегистрировано в Минюсте России 17.03.2017 № 46004). URL: <https://sudact.ru/law/prikaz-minenergo-rossii-ot-06022017-n-74/izmeneniia-kotorye-vnosiatsia-v-nekotorye/prilozhenie-n-2-prilozhenie-n/tablitca-3/> (дата обращения: 12.03.2024).

13. Трофимова Е.А., Кисляк Н.В., Гилев Д.В. Теория вероятностей и математическая статистика / Учеб. пособие: под общ. ред. Е.А. Трофимовой. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. 160 с.

14. Бурдуков Н.И., Галеев М.Т., Волтов И.П. Прогнозирование вероятности аварийных отключений на объектах электросетевого комплекса // Электроэнергия. Передача и распределение. 2017. № 2(41). С. 28–30.

15. Зоркальцев В.И. Многолетние вариации температур и их влияние на экономику и энергетику. Новосибирск: Изд-во «Гео», 2017. 179 с.

## References

1. [2022 annual report of Rosseti Volga, PJSC]. (accessed 04.03.2024). Available at: [https://www.rossetivolga.ru/i/files/2023/7/4/go\\_osseti\\_volga\\_2022.pdf](https://www.rossetivolga.ru/i/files/2023/7/4/go_osseti_volga_2022.pdf). (in Russ.)
2. [Depreciation of Russia's power supply infrastructure. Scale and prospects]. (accessed 31.03.2024). Available at: <https://regnum.ru/article/2348996>. (in Russ.)
3. Naumov I.V. Prognostic Assessment of the Electric Networks Functional State (Using the Example of the PJSC Rosseti Volga – Samara Distribution Networks Branch). *Siberian Federal University. Engineering & Technologies* 2024;17(1):92–106. (in Russ.)
4. [The problem of Russia's ageing power grid]. (accessed 31.03.2024). Available at: <https://energo-news.ru/archives/161370>. (in Russ.)
5. Rudenko Yu.N., editor. [Dependability of energy systems and their equipment: in 4 volumes. Vol.1: Handbook of general models for the analysis and synthesis of dependability of energy systems]. Moscow: Energoatomizdat; 1994. (in Russ.)
6. [Ulyanovsk's distribution networks celebrate their 60-th anniversary]. (accessed 05.04.2024). Available at: <https://ulpressa.ru/2018/07/30/%D1%83%D0%BB%D1%8C%D1%8F%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5-%D1%80%D0%B0%D1%81%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B5-%D1%81%D0%B5%D1%82%D0%B8/>. (in Russ.)
7. [Rosseti Volga, PJSC. Item 19 G. On the primary consumer properties of regulated goods, works, and services]. (accessed 08.03.2024). Available at: [https://www.rossetivolga.ru/ru/klientam/standart\\_raskritiya\\_informatsii\\_subektami\\_optovogo\\_i\\_roznichnogo\\_rinkov\\_elektricheskoy\\_energii/2022god/p19gobosno/](https://www.rossetivolga.ru/ru/klientam/standart_raskritiya_informatsii_subektami_optovogo_i_roznichnogo_rinkov_elektricheskoy_energii/2022god/p19gobosno/). (in Russ.)
8. [Energy workers of Ulyanovskiy seti]. (accessed 04.03.2024). Available at: <https://www.allgen.ru/press/news/show/5442>. (in Russ.)
9. [Information on the primary consumer properties of regulated goods (works, services). On the technical state of grids]. (accessed 13.03.2024). Available at: [https://www.rossetivolga.ru/ru/klientam/standart\\_raskritiya\\_informatsii\\_subektami\\_optovogo\\_i\\_roznichnogo\\_rinkov\\_elektricheskoy\\_energii/2018...2023\\_god/p11binform/](https://www.rossetivolga.ru/ru/klientam/standart_raskritiya_informatsii_subektami_optovogo_i_roznichnogo_rinkov_elektricheskoy_energii/2018...2023_god/p11binform/). (in Russ.)
10. Naumov I.V. Problems of power transmission accident rate (on example of JSC “Omskenergosbyt”). *Safety and Reliability of Power Industry* 2023;16(3):133-142. (in Russ.)
11. Naumov I.V. Assessment of electric energy transport reliability (as exemplified by JSC “Rosseti Siberia Tyvaenergo” power networks). *Safety and Reliability of Power Industry* 2023;16(2):64-72. (in Russ.)
12. [Order of the Ministry of Energy of the Russian Federation dated 02.06.2017 No. 74 On Amendments to Certain Regulatory Legal Acts of the Ministry of Energy of the Russian

Federation on the Investigation of the Causes of Accidents in the Electric Power Industry (Registered with the Ministry of Justice of the Russian Federation on 03.17.2017 No. 46004). (accessed 12.03.2024). Available at: <https://sudact.ru/law/prikaz-minenergo-rossii-ot-06022017-n-74/izmeneniia-kotorye-vnosiatsia-v-nekotorye/prilozhenie-n-2-prilozhenie-n/tablitsa-3/>. (in Russ.)

13. Trofimova E.A., Kislyak N.V., Gilev D.V. Trofimova E.A., editor. [Probability theory and mathematical statistics. A textbook]. Yekaterinburg: Izdatelstvo Uralskogo Universiteta; 2018. (in Russ.)

14. Burdukov N.I., Galeev M.T., Voltov I.P. [Predicting the probability of emergency shutdowns at power grid facilities]. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie* 2017;2(41):28-30. (in Russ.)

15. Zorkaltsev V.I. [Long-term temperature variations and their impact on the economy and energy sector]. Novosibirsk: Izdatelstvo Geo; 2017. (in Russ.)

## Сведения об авторах

**Наумов Игорь Владимирович** – Засл. работн. ВО России, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электроснабжения и электротехники ИРНИТУ и Иркутского ГАУ, академик РАЕ, IEEE Senior member, ул. Черемуховая, дом 19б, поселок Молодежный, Иркутский район, Иркутская область, Российская Федерация, 664038, e-mail: [professornaumov@list.ru](mailto:professornaumov@list.ru)

**Соболева Алина Эдуардовна**. Студентка 3 курса института Энергетики Иркутского национального исследовательского технического университета, ул. Аметистовая, д. 18, поселок Горный, Иркутский район, Иркутская область, Российская Федерация, 664055, email: [alina.sob.27@mail.ru](mailto:alina.sob.27@mail.ru)

## About the authors

**Igor V. Naumov**, Honorary Worker of Higher Education of Russia, Doctor of Engineering, Professor, Professor of the Department of Power Supply and Electrical Engineering, INRTU and Irkutsk SAU, Member of the Russian Academy of Natural History, IEEE Senior Member, 19b Cheremukhovaya St., Molodezhny, Irkutsky District, Irkutsk Oblast, 664038, Russian Federation, e-mail: [professornaumov@list.ru](mailto:professornaumov@list.ru).

**Alina E. Soboleva**. 3rd year student, School of Power Engineering, Irkutsk National Research Technical University, 18 Ametistovaya St., 664055, Gorny, Irkutsky District, Irkutsk Oblast, Russian Federation, email: [alina.sob.27@mail.ru](mailto:alina.sob.27@mail.ru)

## Вклад авторов в статью

**Наумов И.В.** – идея статьи, разработка программ визуализации данных, построение и анализ прогностических моделей чрезвычайных ситуаций, анализ полученных результатов.

**Соболева А.Э.** – сбор и анализ исходной информации, статистическая обработка полученных результатов, анализ полученных результатов.

## Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.





**1980**

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

Разработаны и внедрены отечественные системы автоматической локомотивной сигнализации.



**1956**

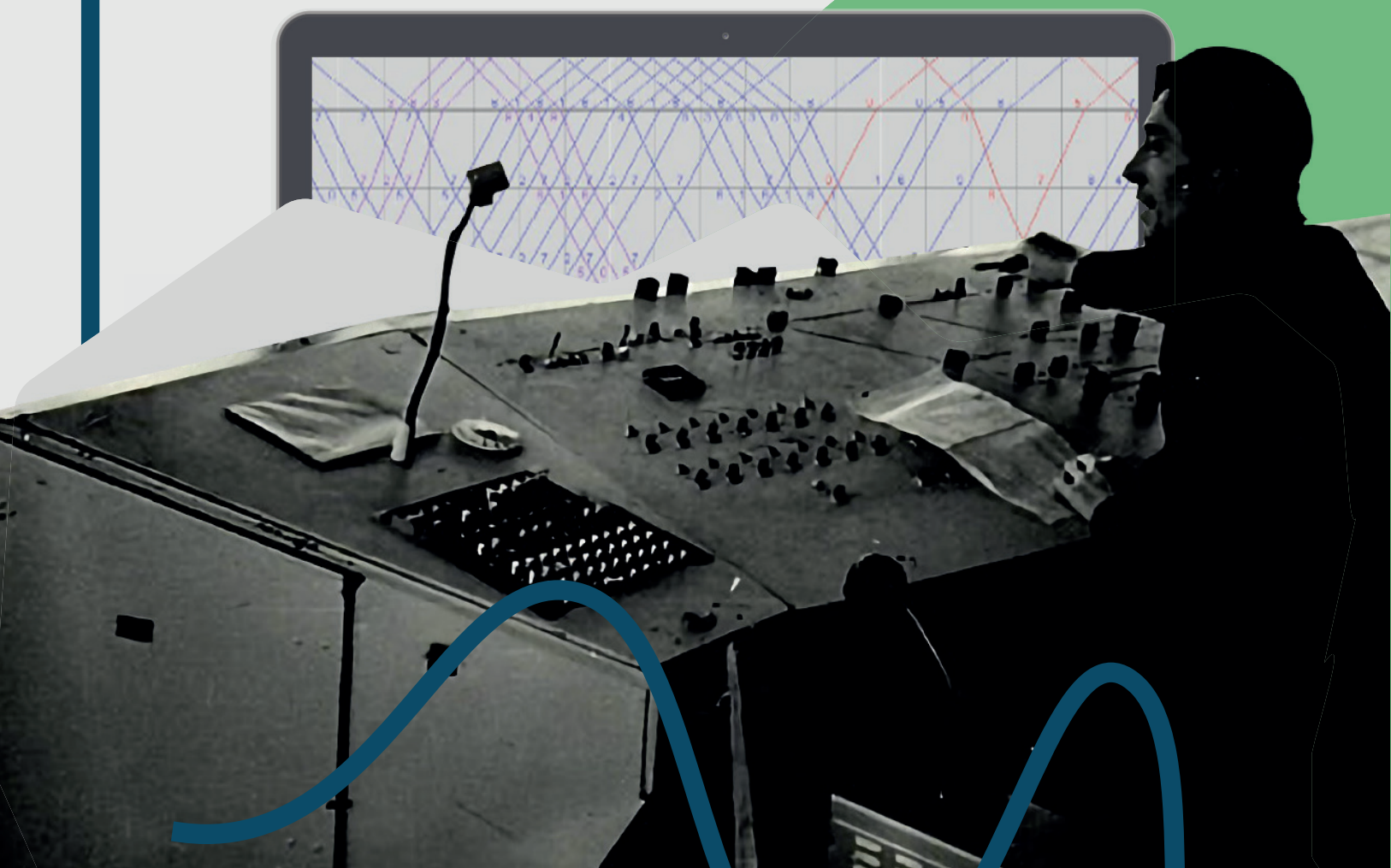
14 февраля 1956 года Министр путей сообщения СССР Б.П. Бещев подписал приказ о создании Конструкторского бюро Главного управления сигнализации и связи (КБ ЦШ).

**1970**

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

**1990**

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





## 2000

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

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

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

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

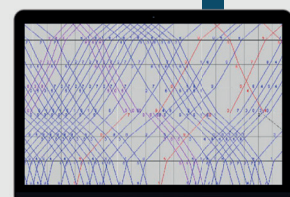


## НИИАС



## 2010

## 2020



## 2025



[niias.ru](http://niias.ru)



[vniias\\_official](#)

# Типичные недостатки в публикациях по надежности

## Typical shortcomings in the dependability-related publications

Нетес В.А.<sup>1\*</sup>  
Netes V.A.<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Московский технический университет связи и информатики, Москва, Российская Федерация

\*v.a.netes@mtuci.ru

<sup>1</sup>Moscow Technical University of Communication and Informatics, Moscow, Russian Federation

\*v.a.netes@mtuci.ru



Нетес В.А.

**Резюме. Цель.** Выявить и разобрать типичные недостатки, встречающиеся в публикациях по надежности, для того чтобы предостеречь авторов будущих публикаций от их повторения. **Методы.** При написании статьи был проведен критический анализ текстов большого числа публикаций и их сравнение с основными положениями базовых отечественных и международных стандартов по надежности. Для анализа были взяты отечественные стандарты, не входящие в систему «Надежность в технике», и учебные пособия для высших учебных заведений. Такой выбор объясняется тем, что характер этих изданий ведет к тиражированию допущенных в них ошибок. Кроме того, для них особенно важно правильное и недвусмысленное изложение материала. **Результаты.** Выявлены и разобраны следующие типичные недостатки, имеющиеся во многих публикациях. 1. Путаница в основных понятиях надежности, выражающаяся в некорректном использовании некоторых базовых терминов. Основные ошибки этого рода таковы: использование термина «надежность» вместо термина «безотказность» и термина «доступность» вместо термина «готовность», что обусловлено неверным (в рассматриваемом контексте) переводом английских терминов “reliability” и “availability” соответственно; использование термина «отказ» для состояния объекта. 2. Ошибки, связанные с показателями надежности: неправильный выбор номенклатуры показателей и использование некорректных названий для показателей. 3. Необоснованное использование простейших формул, справедливых только для экспоненциального распределения наработки до отказа, в общем случае. 4. Отсутствие формулировки критерия отказа при задании количественных требований к надежности. **Заключение.** Результаты статьи помогут авторам будущих публикаций по надежности повысить их качество, избежав повторения указанных недостатков. Для улучшения ситуации предлагаются следующие меры. Организовать тщательное и независимое рецензирование готовящихся к изданию учебных пособий, широкое и беспристрастное обсуждение профессиональным сообществом проектов стандартов и уже изданных материалов с публикацией результатов таких обсуждений. Техническому комитету по стандартизации 119 «Надежность в технике» следует навести порядок в соответствующей системе стандартов, которая должна стать стройной и непротиворечивой основой для написания других публикаций и документов, а также взять на себя экспертизу всех технических стандартов, затрагивающих вопросы надежности.

**Abstract. Aim.** To identify and analyse the shortcomings that are typical for publications on dependability in order to warn the authors of future publications against them. **Methods.** When writing the paper, the author critically analysed a large number of publications and compared them with the key provisions of the basic Russian and international dependability-related standards. The analysis covered Russian standards that are not part of the Dependability in Technics system, as well as course books. This choice is due to the fact that the nature of such publications leads to the replication of errors. In addition, correct and unambiguous presentation of information is especially important for them. **Results.** The following typical shortcomings found in many publications were identified and analysed. 1. Confusion in the basic concepts of dependability causing incorrect use of some basic terms. The most common errors of this kind are as follows: the use of the term “dependability” instead of the term “reliability” and the term “accessibility” instead of the term “availability”, which is due to the incorrect (in this context) translation of the English terms “reliability” and “availability”, respectively; the use of the term “failure” as a state of an item. 2. Errors associated with dependability measures, i.e., incorrect choice of the set of indicators and the use of incorrect names for indicators. 3. Unnecessary use of simple formulas that are valid only for the exponential distribution of time to failure, in the general case. 4. Undefined criterion of failure when setting quantitative dependability requirements. **Conclusion.** The paper’s findings will help the authors of future publications



*on dependability to improve their quality by avoiding the above shortcomings. The following measures are proposed for improving the situation. To ensure thorough and independent review of the forthcoming course books, a broad and impartial discussion by the professional community of draft standards and already published materials with the publication of the results of such discussions. The Technical Committee for Standardization 119 Dependability in Engineering should put into order the corresponding system of standards that is to become a coherent and consistent basis for other publications and documents, as well as undertake the expert assessment of all dependability-related technical standards.*

**Ключевые слова:** надежность, стандарты, учебные пособия, типичные недостатки, безотказность, готовность, показатели надежности, критерий отказа.

**Keywords:** dependability, standards, course books, typical shortcomings, reliability, availability, dependability measures, failure criterion.

**Для цитирования:** Нетес В.А. Типичные недостатки в публикациях по надежности // Надежность. 2025. №1. С. 40-45. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-1-40-45>

**For citation:** Netes V.A. Typical shortcomings in the dependability-related publications. Dependability 2025;1:40-45. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-1-40-45>

**Поступила:** 30.08.2024 / **После доработки:** 25.11.2024 / **К печати:** 05.03.2025

**Received on:** 30.08.2024 / **Revised on:** 25.11.2024 / **For printing:** 05.03.2025

## Введение

Автор этой статьи 50 лет занимается надежностью, почти половину этого срока преподает теорию надежности в вузе, принимал участие в разработке отечественных и международных стандартов по надежности в рамках соответствующих технических комитетов Росстандарта и Международной электротехнической комиссии (МЭК). За это время пришлось видеть и слышать огромное число ошибок в различных публикациях и докладах в этой области. При этом ошибки в работах студентов и аспирантов понятны и простительны, поскольку обусловлены молодостью и неопытностью авторов, хотя и в этих случаях их руководители должны были бы выявить большинство ошибок и потребовать их исправления. Менее простительны и гораздо более огорчительны ошибки, допущенные в публикациях более опытных авторов. Особенно неприятны они в стандартах и учебных изданиях, где, к сожалению, их также встречается немало. Характер этих изданий ведет к тому, что допущенные в них ошибки начинают тиражироваться.

Данная статья анализирует типичные недостатки, которые встречаются в публикациях по надежности. Хорошо известно, что осознание ошибок есть первый шаг на пути к их исправлению. Чтобы ограничить круг рассмотрения, будут взяты только отечественные стандарты, не входящие в систему «Надежность в технике», и учебные пособия. Впрочем, недостатки некоторых международных стандартов, перешедшие в созданные на их основе отечественные стандарты, также будут указаны. Серьезными недостатками обладают и некоторые стандарты системы «Надежность в технике», однако они уже рассматривались в целом ряде публикаций (например, [1–4] и др.).

Важно подчеркнуть, что основная цель статьи не есть просто критика упомянутых в ней публикаций (хотя, конечно, хотелось бы, чтобы в их последующих версиях указанные недостатки были бы исправлены). Главное —

на основе приведенных примеров показать, что в этих (и во многих других) публикациях не так, объяснить, почему те или иные формулировки, положения или формулы ошибочны, и тем самым предостеречь авторов будущих публикаций от повторения подобных ошибок.

## 1. Путаница в основных понятиях

Хорошо известно, что надежность — это сложное свойство, включающее в себя несколько более простых свойств. К сожалению, состав этих свойств различается в отечественных и международных стандартах. Например, в нашей стране одним из свойств, составляющих надежность, традиционно считается сохраняемость, а в международных стандартах такого понятия нет. Поэтому автор считает неправильным разрабатывать стандарты системы «Надежность в технике» на основе международных как идентичные или слегка модифицированные, поскольку это приводит к несогласованности с базовым терминологическим стандартом. Однако использовать зарубежные источники при создании наших стандартов и написании других публикаций, безусловно, нужно. При этом важно не допускать ошибок при переводе основных понятий, в частности в названиях составляющих надежность свойств. Далее рассмотрены две распространенные ошибки такого рода.

Первым из свойств, составляющих надежность, является безотказность, называемая по-английски “reliability”. Это закреплено международным терминологическим стандартом IEC 60050-192:2015<sup>1</sup>. Однако слово “reliability” имеет еще два значения. Дело в том, что в англоязычной терминологии для некоторых показателей надежности используются те же названия, что и

<sup>1</sup> IEC 60050-192:2015. International Electrotechnical Vocabulary — Part 192: Dependability. С его содержанием можно ознакомиться на портале «Электропедия» МЭК: <https://electropedia.org>.

для свойств, характеризующихся этими показателями, и это также закреплено стандартом. В частности, “reliability” означает показатель безотказности, называемый по-русски «вероятность безотказной работы». Наконец, слово “reliability” нередко используется в широком смысле и обозначает надежность в целом. Хотя в стандарте для этого предназначен термин “dependability”, исторически сложилось так, что “reliability” часто выступает как его синоним. Поэтому термин “reliability” нельзя переводить механически, его смысл зависит от контекста. К сожалению, это обстоятельство порой не учитывают.

В частности, если “reliability” стоит в одном ряду с названиями других свойств, составляющих надежность, его следует переводить «безотказность», слово «надежность» в этом контексте будет неправильным. Подобная ошибка допущена, например, в названии стандарта ГОСТ Р 52527–2006<sup>1</sup>. В оригинальном названии стандарта ИСО, на основе которого он создан, имеются слова “reliability, availability, maintainability and safety”, правильным переводом которых будет «безотказность, готовность, ремонтпригодность и безопасность» (попутно исправлена еще одна ошибка: стандартизованный эквивалент английского “maintainability” – «ремонтпригодность»).

Перейдем теперь к рассмотрению понятия «готовность» (availability). В соответствии с ИЕС 60050-192:2015 – это одно из свойств составляющих надежность. То же слово используется и для основного показателя, характеризующего это свойство, по-русски его называют «коэффициент готовности». В отечественных стандартах это свойство много лет в явном виде не присутствовало, хотя коэффициент готовности широко использовался. Более подробно об этом можно прочитать в [3].

К сожалению, английский термин “availability” нередко переводится на русский язык как «доступность». Действительно, словари общей лексики дают в первую очередь это значение. Однако применительно к надежности такой перевод будет неверным. Правильными, т.е. закрепленными стандартами, значениями будут «готовность» или «коэффициент готовности» в зависимости от того, идет ли речь о свойстве или показателе. Добавим к этому, что «доступность» имеет иной смысл и является эквивалентом для другого английского термина “accessibility”. Это установлено во многих стандартах (см. ГОСТ Р 52872–2012, ГОСТ Р ИСО/МЭК 25010–2015, ГОСТ Р 51671–2015, ГОСТ 33249–2015, ГОСТ Р 54937–2018, ГОСТ Р ИСО/МЭК 19086-1–2019, ГОСТ 33652–2019, ГОСТ Р 52872–2019, ГОСТ Р 51671–2020, ГОСТ Р 59812–2021, ГОСТ Р 70186–2022).

Эта ошибка была детально описана и разобрана почти 20 лет назад [5], но повторяется вновь и вновь, в том числе во многих стандартах. В ГОСТ Р ИСО 9000–2015<sup>2</sup> в примечании 3 к термину «характеристика» (п. 3.10.1) в

числе примеров характеристик, связанных со временем, наряду с безотказностью указана доступность. Поскольку здесь имеются в виду характеристики, относящиеся к надежности, и в оригинале написано “availability”, надо было написать «готовность». В ГОСТ Р 57392–2017<sup>3</sup> и ГОСТ Р ИСО/МЭК 20000-1–2021<sup>4</sup> многократно упоминается «доступность», однако в большинстве случаев также следовало использовать термин «готовность». Эта же ошибка допущена в ГОСТ Р 56205–2014<sup>5</sup>. Более того, при определении термина «доступность» (п. 3.2.16) после него в скобках написано «работоспособность». Видимо, эти два термина считаются синонимами, что является еще более грубой ошибкой, поскольку работоспособность – это состояние, а не свойство объекта. Совсем нелепая ситуация в ГОСТ Р ИСО/МЭК 19086-1–2019<sup>6</sup> и ГОСТ Р ИСО/МЭК 25023–2021<sup>7</sup>, в которых термин «доступность» используется сразу в двух смыслах: accessibility и availability. Более того, в последнем упомянутом стандарте в качестве показателей готовности к работе (п. 8.6.2) указаны «доступность системы» и «среднее время недоступности».

Среди студентов, изучающих информационные и коммуникационные технологии, большой популярностью пользуется учебное пособие «Компьютерные сети» (авторы В. Олифер и Н. Олифер), которое за 20 лет выдержало 6 изданий<sup>8</sup>. В нем содержится много полезной информации, но, к сожалению, небольшой раздел, посвященный надежности, оставляет желать много лучшего. В частности, для коэффициента готовности там также использован термин «доступность». Другие, имеющиеся там ошибки, будут указаны ниже.

Одно из важнейших понятий в надежности – отказ. Он определяется как событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта. Однако иногда отказ ошибочно считается состоянием объекта. Например, ГОСТ 27751–2014<sup>9</sup> определяет отказ как «состояние (*sic!*) строительного объекта, при котором не выполняются одно или несколько условий предель-

<sup>3</sup> ГОСТ Р 57392–2017. Информационные технологии. Управление услугами. Часть 10. Основные понятия и терминология.

<sup>4</sup> ГОСТ Р ИСО/МЭК 20000-1–2021. Информационные технологии. Менеджмент сервисов. Часть 1. Требования к системе менеджмента сервисов.

<sup>5</sup> ГОСТ Р 56205–2014 / ИЕС/ТС 62443-1-1:2009. Сети коммуникационные промышленные. Защищенность (кибербезопасность) сети и системы. Часть 1-1. Терминология, концептуальные положения и модели.

<sup>6</sup> ГОСТ Р ИСО/МЭК 19086-1–2019. Информационные технологии. Облачные вычисления. Структура соглашения об уровне обслуживания (SLA). Часть 1. Обзор и концепции.

<sup>7</sup> ГОСТ Р ИСО/МЭК 25023–2021. Системная и программная инженерия. Требования и оценка качества систем и программной продукции (SQuaRE). Измерения качества системы и программной продукции.

<sup>8</sup> Олифер В.Г., Олифер Н.А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Юбилейное издание, дополненное и исправленное. – СПб.: Питер, 2024. – 1008 с.

<sup>9</sup> ГОСТ 27751–2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения.

<sup>1</sup> ГОСТ Р 52527–2006 (ИСО 3977-9:1999). Установки газотурбинные. Надежность, готовность, эксплуатационная технологичность и безопасность.

<sup>2</sup> ГОСТ Р ИСО 9000–2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь.

ных состояний» (п. 2.1.10). Кстати, здесь допущена еще одна серьезная ошибка: предельное состояние имеет отношение к свойству долговечности, а не безотказности. Выражение «состояние отказа» использовано в некоторых учебных пособиях<sup>1</sup>.

## 2. Ошибки, связанные с показателями надежности

Показатели надежности служат для количественной оценки одного или нескольких свойств, составляющих надежность. Ошибки в выборе показателей надежности могут приводить к тому, что какие-то важные аспекты надежности не будут приняты во внимание, или что рассматриваемый технический объект будет считаться достаточно надежным, хотя в действительности он таковым не является, или наоборот надежность необоснованно будет признана низкой и предприняты излишние действия по ее повышению, на которые напрасно будут затрачены время и деньги.

Общие принципы выбора номенклатуры показателей надежности установлены ГОСТ 27.003–2016<sup>2</sup>. Важно подчеркнуть, что показатели выбираются из числа тех, определения которых приведены в терминологическом стандарте по надежности. Для учета особенностей технического объекта и/или специфики его применения допускается модификация стандартизированных показателей, но она не должна противоречить сути их базовых определений. Примеры таких модификаций приведены в приложении А указанного стандарта. Однако порой вводятся показатели, которые по названию, а то и по своей сути, далеки от стандартизированных.

Например, в уже упомянутом выше ГОСТ Р 52527–2006 есть показатель «надежность выполнения задания» (п. 3.59). Соответствующий показатель в стандарте ИСО называется “mission reliability”, и здесь “reliability” означает показатель безотказности, так что правильно его следовало назвать просто «вероятность безотказной работы». При использовании этого показателя, как указано в ГОСТ 27.003–2016, требуемая непрерывная наработка, для которой определяется эта вероятность, принимается равной длительности выполнения одной типовой операции, длительности решения одной типовой задачи, объему типового задания и т.п. Таким образом и осуществляется привязка к выполнению задания. Заметим, что этот показатель нельзя назвать «вероятность выполнения задания», поскольку он учитывает только возможность отказов, но не берет в расчет

другие причины, по которым задание может быть не выполнено (например, ошибки персонала). Что же касается формулы, которая определяет в ГОСТ Р 52527–2006 этот показатель, то она будет рассмотрена ниже.

В этом стандарте есть также другие еще более сомнительные показатели: эквивалентный коэффициент готовности (п. 3.18), коэффициент вынужденного простоя (п. 3.34), коэффициент безотказности (п. 3.82) и др. Кроме того, формула, приведенная для расчета коэффициента оперативной готовности, не соответствует его определению.

В уже упомянутом пособии «Компьютерные сети» в качестве показателя надежности предлагается использовать долю потерянных пакетов информации. Это важный показатель для современных телекоммуникационных сетей, но показателем надежности он не является. Более подробно этот вопрос рассмотрен в [6]. В этом пособии также упоминается «среднее время наработки на отказ». Однако наработка – это продолжительность (т.е. время) или объем работы объекта. Поэтому сочетание «время наработки» – тавтология. Правильное стандартизированное название этого показателя надежности – средняя наработка на отказ (есть также средняя наработка до отказа, средняя наработка между отказами).

При этом для устройств, которые при отказе любого своего компонента переходят в неработоспособное состояние, в пособии «Компьютерные сети» рекомендуется использовать такие показатели, как средняя наработка на отказ, вероятность отказа или интенсивность отказов, а для систем, которые при отказе одного из компонентов могут сохранить свою работоспособность, рекомендуется использовать коэффициент готовности (здесь приведены правильные названия показателей). На самом деле все эти показатели можно использовать в обоих случаях, лишь бы только для рассматриваемого объекта был установлен критерий отказа (о нем еще будет сказано ниже).

Кроме того, в указанном пособии справедливо отмечается, что есть системы, в которых отказы некоторых элементов приводят к некоторому снижению качества работы, а не к полной остановке. Однако характеризовать подобную отказоустойчивость там предлагается лишь качественно. По всей видимости, авторы этого пособия не знакомы с таким показателем надежности, как коэффициент сохранения эффективности [7–10], который как раз и предназначен для количественной оценки надежности таких систем.

## 3. Необоснованное использование простейших формул

В теории надежности часто используется предположение о том, что наработка до отказа имеет экспоненциальное распределение. Такое предположение существенно облегчает решение многих задач, в частности, многие расчетные формулы становятся гораздо проще. Однако эти простейшие формулы нельзя применять в общем случае, они справедливы только для экспоненциального распределения. К сожалению, об этом порой забывают.

<sup>1</sup> Аполлонский С.М., Куклев Ю.В. Надежность и эффективность электрических аппаратов: Учеб. пособие. – СПб.: Изд-во «Лань», 2011. – 448 с.

Атапин В.Г. Основы теории надежности: Учеб. пособие. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 94 с.

Пеленко В.В., Верхованцев А.А., Нечитайлов В.В. Надежность систем производства электрической и тепловой энергии: Учеб. пособие. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2023. – 75 с.

<sup>2</sup> ГОСТ 27.003–2016. Надежность в технике. Состав и общие правила задания требований по надежности.



В качестве примера опять рассмотрим показатель «надежность выполнения задания» из ГОСТ Р 52527–2006. Его определения в стандарте фактически нет, вместо него приведена формула  $\exp(-\lambda t)$ , где  $\lambda$  – интенсивность отказов,  $t$  – время выполнения задания. Это хорошо известная формула для вероятности безотказной работы в случае экспоненциального распределения наработки до отказа. Однако такой вид распределения нигде не оговорен. Наоборот, в этом стандарте есть понятие «ухудшение технического состояния» (п. 3.3), которое происходит вследствие износа. Наличие износа приводит к тому, что интенсивность отказов возрастает со временем, откуда следует, что распределения наработки до отказа не является экспоненциальным.

Немало ошибок связано с коэффициентом оперативной готовности. В общем случае для его расчета справедлива формула, в которой присутствует интеграл [11]. При экспоненциальном распределении наработки до отказа коэффициент оперативной готовности для требуемого времени безотказной работы  $t_{б.р.}$  выражается простой формулой  $K_{о.г.}(t_{б.р.}) = K_r \cdot P(t_{б.р.})$ , где  $K_r$  – коэффициент готовности,  $P(t_{б.р.}) = \exp(-\lambda t_{б.р.})$  – вероятность безотказной работы. Ошибкой является использовать эту формулу в общем случае, а тем более приводить ее как определение этого показателя.

Такая ошибка допущена в ГОСТ Р 53111–2008<sup>1</sup> (п. 5.40), в уже упомянутом ГОСТ 27.003–2016 (табл. Б.1), а также в целом ряде учебных пособий<sup>2</sup>.

#### 4. Отсутствие критерия отказа

Задание требований к надежности, проведение ее анализа и оценки невозможны без установления критерия отказа. Он необходим для разделения возможных состояний рассматриваемого технического объекта на работоспособные и неработоспособные. Исключением является

лишь ситуация, когда для оценки надежности системы используется коэффициент сохранения эффективности. Общие и весьма краткие правила установления критериев отказов приведены в ГОСТ 27.003–2016. Более детально этот вопрос исследован и описан в [12, 13].

В ГОСТ Р 53111–2008 заданы требования к коэффициенту готовности для пяти типов сетей электросвязи: междугородной и международной телефонной связи, зонавой телефонной связи, местной телефонной связи, телеграфной и Телекс, передачи данных. Это предполагает необходимость установления критериев отказов для каждого из этих типов сетей. Однако в стандарте они отсутствуют. Есть только критерии отказов для аналогового и цифрового каналов электросвязи (да и те не вполне правильные), но этого явно недостаточно. Вообще, в телекоммуникациях обычно используется параметрическое определение критерия отказа. При этом выбираются некоторые параметры, характеризующие качество функционирования объекта, для которых устанавливаются пороговые значения, выход за пределы которых считается отказом. В частности, для сетей с коммутацией пакетов определяющим параметром служит упомянутая выше доля потерянных пакетов. Более подробно этот вопрос рассмотрен в [14].

#### Заключение

Проведенный в статье анализ показывает, что многие стандарты и учебные пособия, посвященные надежности, обладают недостатками, что весьма прискорбно, поскольку характер этих изданий способствует тиражированию имеющихся в них ошибок. Поэтому требуется предпринять меры к улучшению ситуации.

В первую очередь следует обратить внимание на необходимость обеспечения широкого обсуждения проектов стандартов профессиональным сообществом и тщательного рецензирования готовящихся к изданию учебных пособий. Ведущим журналам стоит регулярно печатать рецензии на уже вышедшие пособия. При этом надо стремиться к тому, чтобы это были не комплиментарные публикации, заказанные самими авторами рецензируемых изданий, а мнения действительно независимых экспертов.

Техническому комитету (ТК) по стандартизации 119 «Надежность в технике» надо в первую очередь навести порядок в соответствующей системе стандартов, которая должна быть стройной и непротиворечивой основой для написания других публикаций и документов. К сожалению, на сегодняшний день она не может в полной мере играть эту роль [1–4]. Желательно также, чтобы ТК 119 взял на себя экспертизу всех технических стандартов, затрагивающих вопросы надежности. Для этого ему необходимо официально придать статус общетехнического (т.е. межотраслевого или горизонтального по терминологии ИСО и МЭК) и организовать его более тесное взаимодействие с другими ТК.

<sup>1</sup> ГОСТ Р 53111–2008. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки.

<sup>2</sup> Шкляр В.Н. Надежность систем управления: Учеб. пособие. – Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та, 2009. – 126 с.

Аполлонский С.М., Куклев Ю.В. Надежность и эффективность электрических аппаратов: Учеб. пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2011. – 448 с.

Корчагин А.Б., Сердюк В.С., Бокарев А.И. Надежность технических систем и техногенный риск: Учеб. пособие. Ч. 1: Основы теории – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2011. – 228 с.

Савина Н.В. Надежность систем электроэнергетики: Учеб. пособие. – Благовещенск: Амурский гос. ун-т, 2011. – 268 с.

Правиков Ю.М., Муслина Г.Р. Основы теории надежности технологических процессов в машиностроении: Учеб. пособие. – Ульяновск: УлГТУ, 2015. – 122 с.

Ширшиков А.С., Лянденбургский В.В., Белоковильский А.М. Оценка надежности технических систем: Учеб. пособие. – Пенза: ПГУАС, 2015. – 240 с.

Морозов Н.А. Надежность технических систем: Учеб. пособие. – Оренбург: ОГУ, 2019. – 105 с.

Пеленко В.В., Верховланцев А.А., Нечитайлов В.В. Надежность систем производства электрической и тепловой энергии: Учеб. пособие. – СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2023. – 75 с.

## Библиографический список

1. Ершов Г.А., Семериков В.Н., Семериков Н.В. Чему верить? О системе стандартов «Надежность в технике» // Стандарты и качество. 2018. № 8. С. 27–31.

2. Нетес В.А. Как вернуть доверие? О системе стандартов «Надежность в технике» // Стандарты и качество. 2019. № 2. С. 19–24.

3. Нетес В.А., Шпер В.Л. О новых российских терминологических стандартах по надежности. Часть 1 // Стандарты и качество. 2024. № 1. С. 22–27. DOI: 10.35400/0038-9692-2024-1-269-23

4. Нетес В.А., Шпер В.Л. О новых российских терминологических стандартах по надежности. Часть 2 // Стандарты и качество. 2024. № 3. С. 19–23. DOI: 10.35400/0038-9692-2024-3-270-23

5. Нетес В.А. Готовность и доступность – почувствуйте разницу // Вестник связи. 2005. № 8. С. 22–26.

6. Нетес В.А. О показателях надежности и качества в телекоммуникациях // Электросвязь. 2022. № 11. С. 41–45. DOI: 10.34832/ELSV2022.36.11.006

7. Дзиркал Э.В. Задание и проверка требований к надежности сложных изделий. – М.: Радио и связь, 1981. – 176 с.

8. Нетес В.А. Коэффициент сохранения эффективности – показатель надежности сложных систем // Надежность. 2012. № 4. С. 14–23.

9. Нетес В.А. Коэффициент сохранения эффективности и его стандартизация // Надежность. 2021. Т. 21. № 2. С. 3–8. DOI: 10.21683/1729-2646-2021-21-2-3-8

10. Netes V. Effectiveness retention ratio and multi-state systems // Reliability: Theory and Applications. 2021. Vol. 16. No 4. P. 94–104. DOI: 10.24412/1932-2321-2021-465-94-104

11. Надежность технических систем: Справочник / Под ред. И.А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985. 608 с.

12. Нетес В.А. Критерий отказа и подходы к его определению // Методы менеджмента качества. 2017. № 2. С. 50–55.

13. Netes V. Failure criteria and time over thresholds in them // Reliability: Theory and Applications. 2022. Vol. 17. No 4. P. 35–42. DOI: 10.24412/1932-2321-2022-471-35-42

14. Нетес В.А. О нормативных требованиях к надежности сетей электросвязи // Вестник связи. 2022. № 5. С. 6–9.

## References

1. Yershov G.A., Semerikov V.N., Semerikov N.V. [What to believe? On the system of standards “Dependability in engineering”]. *Standarty i kachestvo* 2018;8:14-19. (in Russ.)

2. Netes V.A. [How to regain trust? About the system of standards “Dependability in engineering”]. *Standarty i kachestvo* 2019;2:19-24. (in Russ.)

3. Netes V.A., Shper V.L. [On the new Russian terminological standards for dependability. Part 1]. *Standarty i kachestvo* 2024;1:22-27. DOI: 10.35400/0038-9692-2024-1-269-23. (in Russ.)

4. Netes V.A., Shper V.L. [On the new Russian terminological standards for dependability. Part 2]. *Standarty i kachestvo* 2024;1:22-27. DOI: 10.35400/0038-9692-2024-3-270-23. (in Russ.)

5. Netes V.A. [Availability and accessibility: feel the difference]. *Vestnik svyazi* 2005;8:22-26. (in Russ.)

6. Netes V.A. [On the dependability and quality indicators in telecommunications]. *Electrosvyaz* 2022;11:41-45. DOI: 10.34832/ELSV2022.36.11.006. (in Russ.)

7. Dzirkal E.V. [Specification and Verification of Dependability Requirements of Complex Products]. Moscow: Radio i svyaz; 1981. (in Russ.)

8. Netes V.A. [Efficiency retention factor as a dependability indicator of complex systems]. *Dependability* 2012;4:14-23. (in Russ.)

9. Netes V.A. Effectiveness retention ratio and its standardization. *Dependability* 2021;21(2):3-8. DOI: 10.21683/1729-2646-2021-21-2-3-8.

10. Netes V. Effectiveness retention ratio and multi-state systems. *Reliability: Theory and Applications* 2021;16(4): 94–104. DOI: 10.24412/1932-2321-2021-465-94-104.

11. Ushakov I.A., editor. [Dependability of Technical Systems: a Guidebook]. Moscow: Radio i svyaz; 1985. (in Russ.)

12. Netes V.A. [Criterion of failure and methods of its definition]. *Methods of Quality Management* 2017;2:50-55. (in Russ.)

13. Netes V. Failure criteria and time over thresholds in them. *Reliability: Theory and Applications* 2022;17(4): 35–42. DOI: 10.24412/1932-2321-2022-471-35-42.

14. Netes V.A. Regulatory requirements for the dependability of telecommunication networks. *Vestnik svyazi* 2022;5:6-9. (in Russ.)

## Сведения об авторе

Виктор Александрович Нетес – доктор технических наук, профессор кафедры сетей связи и систем коммуникации Московского технического университета связи и информатики, Москва, Российская Федерация, e-mail: v.a.netes@mtuci.ru.

## About the author

Victor A. Netes, Doctor of Engineering, Professor of the Department of Communications Networks and Switching Systems, Moscow Technical University of Communication and Informatics, Moscow, Russian Federation, e-mail: v.a.netes@mtuci.ru.

## Вклад автора

Автором Нетесом В.А. выполнен анализ различных публикаций по надежности, выявлены встречающиеся в них типичные недостатки, произведены их классификация, разбор и описание.

## Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

# Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем

## Artificial Intelligence: strategies and methods for solving complex problems

Бочкова А.А.<sup>1</sup>  
Bochkova A.A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФБИУКС, НИЯУ МИФИ, г. Москва, Россия

<sup>1</sup>FBIISM, NRNU MEPhI, Moscow, Russia

[aabochkova@gmail.com](mailto:aabochkova@gmail.com)



Бочкова А.А.

**Резюме.** Цель – конкретизировать понятия «искусственный интеллект» и «сложная проблема», а также рассмотреть современное состояние работ в области применения искусственного интеллекта к решению сложных проблем. **Методы.** Использованы методы контекстного поиска, системного анализа и обобщения информации. **Результаты.** Сформулировано ключевое препятствие применения искусственного интеллекта к решению сложных проблем, заключающееся в отсутствии концептуального и технического решения по представлению междисциплинарных знаний в форме, доступной для обработки и синтеза методами искусственного интеллекта. Обучение ЭВМ на разных массивах данных, но без понимания процесса синтеза, с которым так легко справляется мозг человека, не позволяет искусственному интеллекту претендовать на открытие чего-то нового, принципиально неизвестного, без чего невозможно решение сложных проблем. Нужен универсальный язык, имитирующий процессы человеческого мышления. **Заключение.** Выполненный анализ и рекомендации позволяют взглянуть на задачу применения искусственного интеллекта к решению сложных проблем с отличной от принятой в настоящее время точки зрения, опирающейся на использование быстрых алгоритмов поиска (так называемые большие языковые модели). Создание языка-транслятора между различными областями знаний должно способствовать междисциплинарному обмену, развитию творческого мышления, появлению новых идей и генерации инновационных решений в самых разных областях деятельности человека. Разработанный язык позволит решать сложные задачи, объединяя различные дисциплины.

**Abstract.** The Aim is to specify the concepts of “artificial intelligence” and “complex problem”, as well as to examine the state of the art in the application of artificial intelligence in solving complex problems. **Methods.** The author used contextual search, system analysis, and generalisation of information. **Results.** The paper identifies the key obstacle preventing the application of artificial intelligence in solving complex problems that consists in the lack of a conceptual and technical solution to present interdisciplinary knowledge in a form that could be processed and synthesised using artificial intelligence. Computer training that uses a variety of data sets, but does not involve an understanding of the synthesis process that the human brain so easily deals with, prohibits artificial intelligence from discovering something new, fundamentally unknown, which is imperative for solving complex problems. A common language is required that would simulate the processes of human thinking. **Conclusion.** The analysis and recommendations presented in this paper allow looking at the problem of artificial intelligence application as part of solving complex problems from a point of view that is different from the currently common focus on the use of fast search algorithms (the so-called large language models). The creation of a translator language between different fields of knowledge should contribute to an interdisciplinary exchange, the development of creative thinking, the emergence of new ideas and innovative solutions in various fields of human activity. An elaborate language will allow solving complex problems by combining various disciplines.

**Ключевые слова:** искусственный интеллект, сложные проблемы, машинное обучение, ограничения искусственного интеллекта, язык-транслятор.

**Keywords:** artificial intelligence, complex problems, machine learning, limitations of artificial intelligence, translator language.

**Для цитирования:** Бочкова А.А. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем // Надежность. 2025. №1. С. 46-57. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-1-46-57>



**For citation:** *Bochkova A.A. Artificial Intelligence: strategies and methods for solving complex problems. Dependability 2025; 1:46-57. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-1-46-57>*

**Поступила:** 14.05.2024 / **После доработки:** 20.10.2024 / **К печати:** 05.03.2025

**Received on:** 14.05.2024 / **Revised on:** 20.10.2024 / **For printing:** 05.03.2025

## Введение

Искусственный интеллект (ИИ) за последние десятилетия вышел за рамки научно-фантастических концепций и твердо вошел в повседневную жизнь. От советующих систем до автономного вождения – ИИ справляется с задачами, которые ранее казались неразрешимыми.

Научным сообществом широко обсуждается возможность применения ИИ для решения сложных проблем. Однако современная наука и философия затрудняются однозначно определить сам феномен сложности, в то время как важность концептуального выражения феномена сложности усиливается рядом обстоятельств.

Во-первых, классические подходы не могут полностью объяснить сложность. Возникает противоречие между идеей сложности, основанной на простых принципах, и сложным миром.

Во-вторых, научные открытия меняют онтологические и эпистемологические представления современной науки. Сложность рассматривается как аспект взаимоотношений между устойчивостью и изменчивостью, частью и целым, элементом и системой, хаосом и порядком в развивающихся системах.

В-третьих, междисциплинарный синтез стимулирует появление «наук о сложном». Дробление действительности на аналитические единицы не может адекватно описать сложные системы.

В-четвертых, сложность рассматривается как философская проблема с собственной онтологией<sup>1</sup> и гносеологией<sup>2</sup>.

При использовании ИИ для решения сложных проблем необходимо учитывать эти обстоятельства. Сложные проблемы требуют глубокого анализа, творческого мышления и нестандартных подходов для их решения, так как они характеризуются высокой степенью неопределенности и множеством взаимосвязанных факторов. Они часто встречаются в различных областях, где требуется принятие обоснованных решений.

При размышлении о создании систем ИИ, способных решать сложные проблемы, полезно обратить внимание на методы, используемые учеными, которые обычно декомпозируют задачу на подзадачи, определяют, какие явления нужно объяснить с помощью теории, и какие

ограничения следует наложить на теорию на основе имеющихся знаний. После определения области и ограничений можно приступить к задаче оптимизации. Однако часто бывает сложно пройти путь от сложной задачи к простой, поскольку ученые могут понять, что их исходная проблема была неверной. Это может произойти по разным причинам, например, из-за внутренних противоречий или парадоксов в теории. Иногда ученые осознают, что теория может объяснить более широкий спектр явлений, что требует пересмотра области исследования. Также возможен пересмотр ограничений при изменении доменов и появлении новых эмпирических феноменов. Создание и решение проблемы тесно связаны в научной практике, и важно понимать, говоря об ИИ, что это не сводится к простому моделированию данных или обучению.

## 1. Историческое отступление

Среди главных фигур в истории ИИ – Алан Тьюринг, Айзек Азимов, Сатьяджит Рэй и Леонардо Торрес Кеведо. Так, работы Алана Тьюринга [1], оказали влияние на развитие ИИ, в частности его работа «Вычислительная техника и интеллект». Айзек Азимов внес свой вклад в разработку концепции ИИ в своих научно-фантастических работах [2]. Сатьяджит Рэй использовал научную фантастику для исследования взаимосвязи между разумом и интеллектом в постколониальную эпоху [3]. Леонардо Торрес Кеведо внес значительный вклад в автоматизацию, информатику и ИИ в начале XX века [4]. Эти люди сыграли решающую роль в формировании области ИИ и его философских основ.

Большая часть классических работ по научному ИИ (в основном Саймона, Лэнгли и их соавторов [5], а также более поздних работ Шмидта и Липсона [6], Удреску и Тегмарка [7] и других) была сосредоточена на решении легких задач. Для Саймона и Лэнгли этот подход основывался на психологическом тезисе о том, что научное познание – это, по сути, то же самое, что и обычное решение задач, только применяется к другому (и иногда более сложному) набору проблем. Они разработали алгоритмы, имитирующие решение задач человеком, и применили их к научным открытиям. Этот подход подвергся критике со стороны Чалмерса, Френча и Хофстедтера [8], поскольку он наделял алгоритмы представлением проблемы, которое уже содержало основные примитивы, необходимые для окончательной теории. Саймон настаивал (вопреки Попперу) на существовании логики научного открытия, но на самом деле это была логика решения научных проблем (т. е. оптимизации), а не открытия в смысле создания проблем.

<sup>1</sup> Онтология – учение о сущем; учение о бытии как таковом; раздел философии, изучающий фундаментальные принципы бытия, его наиболее общие сущности и категории, структуру и закономерности. Философское учение об общих категориях и закономерностях бытия, существующее в единстве с теорией познания и логикой.

<sup>2</sup> Гносеология – философская дисциплина, занимающаяся исследованиями, критикой и теориями познания.

Современные официальные документы [9] определяют ИИ как комплекс технологических решений, позволяющий имитировать когнитивные функции человека (включая самообучение, поиск решений без заранее заданного алгоритма и достижение инсайта) и получать при выполнении конкретных практически значимых задач обработки данных результаты, сопоставимые, как минимум, с результатами интеллектуальной деятельности человека. Комплекс технологических решений включает в себя информационно-коммуникационную инфраструктуру, программное обеспечение (в том числе, в котором используются методы машинного обучения), процессы и сервисы по обработке данных, анализу и синтезу решений.

## **2. Решение проблем с помощью искусственного интеллекта**

### **2.1. Простые и сложные проблемы**

Большинство работ по применению ИИ в решении проблем сосредоточено на том, что можно назвать «легкой проблемой». Ученые определяют функцию, которую они хотят оптимизировать (например, функцию, оценивающую структуру сворачивания белков или конструкцию термоядерного реактора). К этой задаче можно применить инструменты оптимизации ИИ. До сих пор подобные приложения были весьма успешными [10]. «Легкой» задачу делает не форма решения (которая может потребовать большой инженерной работы), а форма проблемы. С самого начала ясно, что нужно оптимизировать и какие инструменты можно использовать для решения этой проблемы. Инженерный прорыв происходит за счет создания гораздо более совершенных версий этих инструментов. Другими словами, проблема относительно проста, потому что не требует концептуальных прорывов, подобных открытию теории относительности, генетики или периодической таблицы элементов. Можно сказать, что эти концептуальные прорывы являются паттернами, которые можно обнаружить с помощью достаточно мощной системы распознавания образов. Но прежде, чем произойдет формирование паттерна, что-то должно подсказать системе распознавания образов, какого рода образцы интересны, важны и полезны. Какую проблему призвана решить система распознавания образов, и откуда это следует?

Фундаментальный барьер на пути автоматизации решения сложных проблем – концептуальный. Великие ученые – это не просто выдающиеся оптимизаторы обычных задач. Чаще всего великие ученые – это обычные оптимизаторы, решающие необычные оптимизационные задачи. Именно постановка проблемы, а не ее решение, является по-настоящему трудной проблемой. Можно было бы склониться к тому, чтобы отнести трудную проблему на задворки «революционной науки», которые редко прорываются в основную научную практику, в то время как легкая проблема

занимает основное место в «нормальной науке», на которую ученые тратят большую часть своего времени. Однако нормальная наука – это не просто оптимизация и не каталог оптимизационных задач, ожидающих решения. Фундаментальный барьер здесь тот же, что и для ученых в области ИИ: это концептуальная проблема постановки оптимизационной задачи. Это касается как крупных концептуальных прорывов, таких как теория относительности, так и более скромных, регулярно достигаемых молодыми исследователями при подготовке и защите кандидатских диссертаций, которые, тем не менее, остаются недостижимыми для существующих систем ИИ.

### **2.2. Перспективные стратегии решения сложных проблем с помощью искусственного интеллекта**

Стратегии и методы ИИ для решения сложных проблем остаются в центре внимания исследований в последние годы. Один из подходов заключается в использовании циклов решения проблем, которые включают распознавание проблемы, ее определение, разработку стратегии, организацию знаний и ресурсов, мониторинг прогресса и оценку эффективности решения [11]. Другая перспектива заключается в создании систем социально-технической поддержки стратегического управления на основе ИИ, которые анализируют организации как системы социальных коммуникаций и генерируют стратегическую информацию на основе качественных данных [12]. В строительной отрасли технологии ИИ можно систематически внедрять для улучшения процессов, комбинируя инструменты из теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) и Six Sigma [13]. Кроме того, интеграция иерархических механизмов, вдохновленных биологическими методами, с обучением с иерархическим подкреплением может развить навыки решения проблем с помощью искусственных агентов [14]. Сложные сети также можно использовать в качестве механизмов ИИ, где головоломки собираются с помощью механизмов сетевой обработки, используя разные стратегии распределения и буферизации, обеспечивающие различную производительность [15].

Наиболее перспективные стратегии решения сложных проблем с помощью ИИ включают интеграцию иерархических когнитивных механизмов, моделей машинного обучения и методов поиска. Иерархическое обучение с подкреплением, вдохновленное когнитивной психологией, показывает потенциал для развития поведения искусственных агентов при решении проблем [16]. Например, модели машинного обучения, такие как XGBoost, обученные на молекулярных дескрипторах, позволяют точно прогнозировать растворимость лекарств в сложных системах [14]. Кроме того, методы поиска играют решающую роль в стратегиях решения проблем в ИИ, обеспечивая общую связь между различными подходами [17].

Эти стратегии открывают возможности для расширения знаний и повышения эффективности ИИ при решении сложных задач по решению проблем. Остановимся подробнее на основных группах стратегий и методов, используемых ИИ для решения сложных проблем.

**1. Машинное обучение.** ИИ может использовать методы машинного обучения, чтобы обучаться на основе больших объемов данных. Это включает в себя личные подходы, такие как нейронные сети, решающие деревья, методы кластеризации и другие. Машинное обучение произвело революцию в подходе к сложным задачам, позволив алгоритмам и моделям учиться на данных и делать прогнозы или решения без явного программирования. Оно применялось в различных областях, таких как энергетика, экономика, позиционирование помещений и бизнес. В области энергетике алгоритмы машинного обучения могут прогнозировать спрос на энергию, оптимизировать использование возобновляемых источников энергии и повышать эффективность электростанций [18]. В экономике машинное обучение позволяет анализировать экономические показатели для прогнозирования будущего экономического роста и выявления новых возможностей для бизнеса. При позиционировании в помещении методы машинного обучения позволяют уменьшить зоны путаницы и повысить точность [19]. В деловом мире интеллектуальный анализ данных и аналитика позволили компаниям оптимизировать операции, оптимизировать процессы и принимать обоснованные решения [20]. Машинное обучение предлагает мощный подход к решению сложных реальных проблем и находит широкое применение в различных областях [21].

**2. Глубокое обучение.** Глубокое обучение позволяет ИИ извлекать сложные закономерности из данных и решать сложные задачи, такие как распознавание образов и естественного языка. Глубокое обучение, подобласть машинного обучения, используется для решения сложных задач путем обучения искусственных нейронных сетей с большими объемами данных. Оно успешно применяется в различных областях, таких как компьютерное зрение, обработка естественного языка, робототехника и видеоаналитика [22, 23]. Глубокие нейронные сети с несколькими слоями взаимосвязанных узлов позволяют моделировать сложные взаимосвязи между входами и выходами [24]. Алгоритмы глубокого обучения позволяют этим сетям со временем учиться и совершенствоваться, регулируя вес и смещение нейронов [25]. Использование глубокого обучения произвело революцию в промышленности и может сформировать будущее технологий [26]. Кроме того, глубокое обучение с подкреплением, являющееся разновидностью глубокого обучения, зарекомендовало себя как перспективное решение проблем последовательного принятия решений на основе использования человеческого опыта.

**3. Эволюционные алгоритмы.** Это методы, которые моделируют процесс естественного отбора

для решения оптимизационных задач. ИИ может использовать эволюционные алгоритмы для поиска оптимальных решений в сложных пространствах параметров. Эволюционные алгоритмы (ЭА) показали высокую адаптивность при решении сложных задач оптимизации. Они особенно эффективны при решении сложных комбинаторных задач оптимизации [27]. Для расчета физической подготовленности индивидуумов специалисты используют методы оценки физической формы, а существующие методы могут оказаться непригодными для решения проблем с нечеткой информацией о физической форме [28]. Для решения этой проблемы был предложен метод оценки физической формы слепых (BFEM), в котором для оценки физической формы на основе нечеткой информации о физической форме используется искусственная нейронная сеть (ANN) [29]. Было показано, что этот подход обеспечивает аналогичную или более высокую точность оценки физической формы по сравнению с методами, основанными на четкой информации о физической форме [30]. Кроме того, задачи многоцелевой оптимизации можно эффективно решать с помощью помощников, таких как использование многоцелевых эволюционных алгоритмов (МОЕА) для решения реальных задач. В целом, советники доказали свою высокую эффективность при решении сложных задач оптимизации, в том числе задач, связанных с шумом и несколькими целями.

**4. Логическое программирование.** Это метод, основанный на формализации знаний и использовании логических правил для решения проблем. ИИ может использовать логическое программирование для рассуждения и принятия решений на основе заданных правил и фактов. Логическое программирование – это область компьютерных наук, которая использует логику для решения сложных задач. Это требует творческого подхода, нестандартного мышления и глубокого понимания правил, как и создание хорошей шутки [31]. Логическое программирование можно применять в различных реальных сценариях, например в рассуждениях о сложных сетях. Язык MancaLog, основанный на логическом программировании, обеспечивает формализм рассуждений в сложных сетях и успешно применяется к таким задачам, как определение принадлежности к группе в социальных сетях [32]. Кроме того, логическое программирование можно использовать при анализе данных для выявления релевантных функций в наборах данных. Вычислительные задачи, связанные с выбором и эквивалентностью паттернов, могут быть решены с использованием моделей целочисленного программирования [33]. Кроме того, интеграция больших языковых моделей (LLM) с символическим мышлением, известная как Logic-LM, показала многообещающие результаты в улучшении решения логических задач [34]. В целом логическое программирование предлагает ценный подход к решению сложных задач в различных областях.



**5. Нейроэволюция.** Это комбинация методов эволюционных алгоритмов и нейронных сетей. ИИ может использовать нейроэволюцию для эволюции структуры и параметров нейронных сетей, чтобы достичь оптимальных решений. Нейроэволюция – это метод, используемый для решения сложных задач машинного обучения и задач управления. Он включает развитие нейронных сетей с помощью эволюционных стратегий для формирования разнообразных моделей поведения или навыков, которые можно использовать для задач адаптации или иерархического планирования. Доказано, что методы нейроэволюции, такие как разнообразие качества (QD), представляют собой конкурентоспособную альтернативу ИИ, дополненному теорией информации, для выявления навыков. Они обеспечивают такую же или улучшенную производительность, но при этом менее чувствительны к гиперпараметрам и более масштабируемы [35]. Другой алгоритм нейроэволюции под названием «Адаптивная геномная эволюция топологий нейронных сетей» (AGENT) решает проблемы стагнации и медленной конвергенции, контролируя разнообразие популяций и баланс исследований и эксплуатации. AGENT превосходит стандартные методы RL и оригинальный алгоритм NEAT в задачах эталонного управления [36]. Нейроэволюция также применялась к решению дифференциальных уравнений, где она показала возможность находить более точные решения с помощью более оптимизированных нейронных сетей по сравнению с вариантами стохастического градиентного спуска (SGD) [36].

**6. Алгоритмы обработки естественного языка.** ИИ может использовать алгоритмы обработки естественного языка для анализа и понимания текстовых данных. Это позволяет ИИ выполнять задачи, такие как автоматическое аннотирование текста, машинный перевод и анализ настроений. Алгоритмы обработки естественного языка (NLP), такие как искусственные нейронные сети (ANN), сверточные нейронные сети (CNN) и рекуррентные нейронные сети (RNN), использовались для решения широкого спектра сложных задач. Эти алгоритмы применялись к таким задачам, как моделирование предложений, семантическая маркировка ролей, распознавание именованных сущностей, ответы на вопросы, категоризация текста и машинный перевод [37, 38]. Кроме того, использование современных методов NLP, основанных на архитектуре трансформаторов, таких как модели BERT и XLnet, показало многообещающие результаты в таких задачах, как обнаружение атак с помощью социальной инженерии [39]. Кроме того, доступны тесты, такие как CommaQA и nLGraph, которые оценивают эффективность моделей NLP при решении сложных задач на логику и решении проблем на основе графиков [40, 41].

В зависимости от конкретной задачи и доступных данных, ИИ может применять различные комбинации этих методов для достижения оптимальных результатов.

### 3. Ограничения и регулирование использования искусственного интеллекта для решения сложных проблем

#### 3.1. Когнитивные ограничения

Решение любой сложной проблемы на стыке различных областей упирается, прежде всего, в проблему невозможности представить знание универсальным образом. За математическими формулами, описывающими, например, поведение технической системы, легко утрачивается физический смысл. Формальный характер математики входит в противоречие с неформальным характером творческого мышления. Кроме того, междисциплинарный характер современного познания во многом обусловлен тем, что наука из «дисциплинарной» сферы деятельности превращается в «проблемно ориентированную». Решение сложных проблем – всегда синтез знаний из самых разных областей человеческой деятельности. Можно «обучить» ЭВМ на разных массивах данных, но без понимания процесса синтеза, с которым так легко справляется наш мозг, ИИ не может претендовать на открытие чего-то нового, принципиально неизвестного. Нужен универсальный язык, имитирующий процессы мышления.

Представление междисциплинарных знаний в области ИИ сопряжено с рядом проблем. Одна из основных проблем заключается в отсутствии общих понятий и терминов между различными дисциплинами [43]. Другой проблемой является огромное количество релевантной литературы, требующей эффективных поисковых систем и автоматизированного анализа контента для извлечения релевантной информации. Эксперты из разных дисциплин могут использовать одни и те же слова в разных значениях или не знать специальных терминов, используемых в других дисциплинах [43]. Экспертная оценка междисциплинарных работ, объединяющих различные темы, также является проблемой. Это создает коммуникационный разрыв и затрудняет определение того, когда эксперты из разных дисциплин говорят об одной и той же проблеме [44]. Другой проблемой является необходимость эффективных методов представления знаний и аргументации, позволяющих рассуждать о междисциплинарных знаниях [45]. Кроме того, представление знаний из открытой, динамичной и реальной среды, а также моделирование механизмов человеческого мышления и объяснения являются важными проблемами при представлении междисциплинарных знаний в ИИ [46]. Кроме того, развитие регулирующих органов необходимо для обеспечения ответственных исследований в области ИИ. Наконец, обучение ИИ требует большего внимания и инноваций для поддержки междисциплинарных исследований.

Уместно будет вспомнить, что еще в 1982-1986 годах группой молодых ученых-физиков МИФИ и лингвистов МГУ на базе диалектики Гегеля, теории суперсимметрии [47] и музыкальной гармонии был разработан универсальный язык Диал [48, 49]. Фундаментальные принципы Диала заложены [50] канд. физ-мат. наук Куликовым В.В. Было задумано, что язык будет использоваться как средство для решения теоретических проблем в физике и квантовой механике. Он основан на диалектической логике, примененной к абстрактной теории симметрии. Диал, в отличие от математики, должен был быть не только письменным, но и устным. Диал представляет собой язык-транслятор знаний между различными областями, способствует междисциплинарному обмену, развитию творческого мышления, появлению новых идей и генерации инновационных решений. Развитый язык позволяет решать сложные задачи, объединяя различные дисциплины. Его главная функция – отражение всех аспектов мира природы и человека. В Диале используются фундаментальные принципы преобразования симметрии для решения изобретательских задач. В теории решения изобретательских задач (ТРИЗ) эмпирически выявлено 50 типовых приемов разрешения технических противоречий и 76 стандартов на решение изобретательских задач [51]. Диал полон универсальными принципами развития систем и методами разрешения противоречий. С помощью его супероператоров можно логически создавать новые стандарты. Однако в настоящее время работы по Диалу практически свернуты, а каких-то новых, прорывных решений в этой области не появилось. Научные поиски сосредоточились на развитии т.н. «больших языковых моделей»<sup>1</sup>.

### 3.2. Технические ограничения

ИИ сталкивается с рядом проблем и ограничений при использовании для решения сложных задач. Одной из основных проблем является отсутствие инфраструктуры данных и квалифицированного персонала, что препятствует успешному внедрению систем ИИ [52]. Другой проблемой является сложность понимания и объяснения того, как работают системы ИИ, что приводит к недоверию и зависимости от этих систем [53]. Кроме того, существуют проблемы с определением и классификацией терминов, связанных с ИИ, особенно при изучении ложной информации [54]. Более того, системы ИИ часто не учитывают социальные и структурные репрессивные системы, что приводит к негативным последствиям для маргинализированных сообществ [55]. Эти проблемы и ограничения подчеркивают необходимость междисциплинарного подхода к решению научных и этических проблем, связанных с ИИ.

<sup>1</sup> Большая языковая модель – это языковая модель, состоящая из нейронной сети со множеством параметров, обученной на большом количестве неразмеченного текста с использованием обучения без учителя. БЯМ появились примерно в 2018 году и хорошо справляются с широким спектром задач.

### 3.3. Этические ограничения

Этические последствия использования ИИ для решения сложных проблем включают опасения по поводу предвзятости, конфиденциальности, подотчетности, прозрачности, алгоритмической предвзятости и дискриминации, неправильного использования данных и технических проблем, автономии пациентов в принятии решений, уверенности в точности результатов, перемещения рабочих мест, экономического неравенства, автономии принятия решений, согласования ценностей, безопасности, управления и важности продолжения исследований и образования [56-59]. Эти этические проблемы подчеркивают необходимость ответственной разработки, внедрения и регулирования технологий ИИ для обеспечения их полезной и этической интеграции в общество [60]. При развитии ИИ важно создавать этическую среду, укреплять доверие, повышать прозрачность и подотчетность, а также разрабатывать системы ИИ, демонстрирующие ответственность. Быстро меняющийся ландшафт этики ИИ требует постоянных исследований, обучения и совместного управления для эффективного устранения этих этических ограничений.

### 3.4. Правовое регулирование и управление искусственным интеллектом при решении сложных задач

Правовое регулирование и управление ИИ при решении сложных задач – непростая задача. Широкое применение технологии ИИ в клинической практике вызвало правовые опасения относительно риска нарушений при клинической диагностике и хирургии [61]. Реализация различных отношений с использованием ИИ требует принятия гармонизирующих актов, регулирующих эти отношения и обеспечивающих права граждан [62]. Сложность систем ИИ, их взаимосвязанность с организациями и людьми, а также субъективный характер таких целей, как справедливость, затрудняют регулирование и управление [63]. Однако при соответствующих инвестициях сложность можно успешно решить [64]. Использование ИИ в нормативных механизмах может принести как пользу, так и вред, в зависимости от того, используется ли ИИ для поддержания существующих иерархий или для улучшения нашей жизни и будущего [65].

В настоящее время многие страны разработали правовые инструменты, такие как стратегии и программные акты по регулированию ИИ, но необходимо уделять больше внимания защите прав и интересов граждан и эффективным механизмам управления и предоставления государственных услуг. Разработка всеобъемлющей нормативной базы необходима для контроля за всем жизненным циклом систем ИИ от их разработки до внедрения [61]. Эти рамки должны предусматривать конкретные оперативные мандаты

и надзорные механизмы для эффективного регулирования систем ИИ [62]. Кроме того, правовое регулирование ИИ может решать такие вопросы, как риск нарушений, ответственность и защита прав и интересов [65, 66]. Гармонизация законов и унифицированных на международном уровне нормативных актов, таких как Модельная конвенция о робототехнике и ИИ, может облегчить регулирование отношений, связанных с ИИ, в глобальном масштабе [63]. Кроме того, создание институтов, механизмов и стандартов этического кодирования и профессиональной социотехнологической практики может способствовать социальному регулированию разработки и внедрения ИИ.

В целом правовое регулирование и управление ИИ имеют решающее значение для обеспечения качества, безопасности и этичного использования систем ИИ при решении сложных проблем.

## Заключение

Таким образом, необходимо помнить, что когнитивные, технические, социологические, эстетические и утилитарные соображения неизбежно появляются на этапе возникновения проблемы.

Решение любой сложной проблемы неизбежно возникает на стыке различных областей, что требует решить задачу представления знания, используемого ИИ, универсальным образом. Исследовательская программа для решения этой сложной проблемы должна начинаться с когнитивной науки, сосредоточенной на малоизученных субъективных, творческих аспектах, о которых говорилось выше, и на том, как они взаимодействуют с объективными аспектами решения проблем. Как только мы поймем, как и что делают люди, с достаточной точностью, чтобы формализовать эти аспекты, мы сможем попытаться использовать эти знания для создания масштабируемого ИИ. Обучение ИИ – это не только формирование его «вкусов, стиля и предпочтений», но и наделение его мощными способностями к решению сложных проблем. То есть, необходим универсальный «язык», имитирующий процессы мышления.

По крайней мере, на начальном этапе маловероятно, что это будут самостоятельные системы, скорее, они будут помощниками, наделенными некоторой технической эрудицией, но нуждающимися в экспертном руководстве человеком.

## Библиографический список

1. Mukherjee U.P. From Tafa to Robu: AI in the Fiction of Satyajit Ray. / In: Imagining AI: How the World Sees Intelligent Machines. Oxford, 2023. DOI: 10.1093/oso/9780192865366.003.0015
2. Moloi T., Marwala T. A High-Level Overview of Artificial Intelligence: Historical Overview and Emerging Developments / In: Artificial Intelligence and the Changing Nature of Corporations. Springer, Cham, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-76313-8\_2

3. Tencent Research Institute, CAICT, Tencent AI Lab., Tencent open platform. Artificial Intelligence's Past / In: Artificial Intelligence. Palgrave Macmillan, Singapore, 2021. DOI: 10.1007/978-981-15-6548-9\_2
4. González de Posada F., González Redondo F.A., Gonzalez A.H. Leonardo Torres Quevedo: Pioneer of Computing, Automatics, and Artificial Intelligence // IEEE Annals of the History of Computing. 2021. Vol. 43. Issue 3. Pp. 22-43. DOI: 10.1109/MAHC.2021.3082199
5. Bradshaw G.F., Langley P.W., Simon H.A. (1983). Studying scientific discovery by computer simulation // Science. 1983. Vol. 222. No. 4627. Pp. 971-975.
6. Schmidt, M., & Lipson, H. (2009). Distilling free-form natural laws from experimental data // Science. 2009. Vol. 324. Pp. 81-85.
7. Udrescu S.M., Tegmark M. (2020). AI Feynman: A physics-inspired method for symbolic regression. Science Advances. Vol. 6. Issue 16. DOI: 10.1126/sciadv.aay2631
8. Chalmers D.J., French R.M., Hofstadter D.R. High-level perception, representation, and analogy: A critique of artificial intelligence methodology // Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence. 1992. Vol. 4. Pp. 185-211.
9. ГОСТ Р 59277-2020. Системы искусственного интеллекта. Классификация систем искусственного интеллекта. М.: Стандартинформ, 2021. IV, 12 с.
10. Jumper J., Evans R., Pritzel A. et al. Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold // Nature. 2021. Vol. 596. Pp. 583-589.
11. Biswas A.K. (2022). Autonomous Intelligence in Problem-Solving by Searching in the field of Artificial Intelligence // International journal of scientific research in science, engineering and technology. 2022. Vol. 9. No. 6. DOI: 10.32628/ijrsrset22962
12. Azzam M., Beckmann R. How AI Helps to Increase Organizations' Capacity to Manage Complexity – A Research Perspective and Solution Approach Bridging Different Disciplines // IEEE Transactions on Engineering Management. 2022. Vol. 71. Pp. 2324-2337. DOI: 10.1109/tem.2022.3179107
13. Systematic Complex Problem Solving in the Age of Digitalization and Open Innovation: 20th International TRIZ Future Conference, TFC 2020, Cluj-Napoca, Romania, October 14–16, 2020, Proceedings / D. Cavallucci, S. Brad, P. Livotov (eds). Springer International Publishing, 2020. 466 p. DOI: 10.1007/978-3-030-61295-5
14. Eppe M., Gumbsch C., Kerzel M. et al. Intelligent problem-solving as integrated hierarchical reinforcement learning // Nature Machine Intelligence. 2022. Vol. 4. Pp. 11-20. DOI: 10.1038/s42256-021-00433-9
15. De Arruda H.F., Comin C.H., Costa L. da F. Problem-solving using complex networks // The European Physical Journal B: Condensed Matter and Complex Systems. 2019. Vol. 92. Issue 6. Pp. 1-9. DOI: 10.1140/EPJB/E2019-100100-8
16. Xinxin Liu. Opportunities of artificial intelligence for supporting complex problem-solving: Findings from



a scoping review // *Computers & Education: Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 4. P. 100138. DOI: 10.1016/j.caeai.2023.100138

17. Wang S., Ji Y. A strategy of artificial intelligence with chemical fingerprinting to predict drug phase behaviors in complex systems / Preprint. 2023. DOI: 10.22541/au.168106505.57179711/v1

18. Li X., Lin W., Guan B. The impact of computing and machine learning on complex problem solving // *Engineering reports*. 2023. Vol. 5. No. 6. DOI: 10.1002/eng2.12702

19. Li B., Wei Z., Wu J. et al. Machine Learning-enabled Globally Guaranteed Evolutionary Computation // *Nature Machine Intelligence*. 2023. Vol. 5. Pp. 457-467. DOI: 10.1038/s42256-023-00642-4

20. Zhang W. Machine Learning for Solving Unstructured Problems / In: Nakamori Y. (ed.) *Knowledge Technology and Systems*. Translational Systems Sciences. Vol 34. Springer, Singapore, 2023. DOI: 10.1007/978-981-99-1075-5\_4

21. Suyal P., Dutt S., Sharma R. et al. (2022). An Agile Review of Machine Learning Technique // *Proceedings of 2022 11th International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART)* (16-17 December 2022). 2022. Pp. 75-79. DOI: 10.1109/SMART55829.2022.10047305

22. Douglass F. Deep Learning and Neural Networks: Methods and Applications / In: Shanmugam T., Bansal S.A. (eds). *Cutting-Edge Technologies In Innovations In Computer Science And Engineering*. San International Scientific Publication, 2023. 250 p. DOI: 10.59646/csebookc8/004

23. Yamana Y. Deep Learning and Neural Networks: Methods / In: Shanmugam T., Bansal S.A. (eds). *Cutting-Edge Technologies In Innovations In Computer Science And Engineering*. San International Scientific Publication, 2023. 250 p. DOI: 10.59646/csebookc7/004

24. Nguyen T.T., Nguyen C.M., Huynh-The T. et al. (2023). Solving Complex Sequential Decision-Making Problems by Deep Reinforcement Learning with Heuristic Rules / In: *Computer Science – ICCS 2023: 23rd International Conference, Prague, Czech Republic, July 3–5, 2023, Proceedings, Part II*. Pp. 298-305. DOI: 10.1007/978-3-031-36021-3\_30

25. Pattanayak S. Mathematical Foundations / In: *Pro Deep Learning with TensorFlow 2.0*. Apress, Berkeley, CA, 2023. Pp. 1-108. DOI: 10.1007/978-1-4842-8931-0\_1

26. Tian S.F., Li B. Gradient-optimized physics-informed neural networks (GOPINNs): a deep learning method for solving complex nonlinear problems // *Acta Phys. Sin.* 2023. Vol. 72(10). P. 100202. DOI: 10.7498/aps.72.20222381

27. Gaspar-Cunha A., Costa P., Monaco F. et al. Scalability of Multi-objective Evolutionary Algorithms for Solving Real-World Complex Optimization Problems / In: Emmerich M. et al. *Evolutionary Multi-Criterion Optimization. EMO 2023. Lecture Notes in Computer Science*, vol 13970. Springer, Cham, 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-27250-9\_7

28. Zhao X., Jia X., Zhang T. et al. Evolutionary Algorithms With Blind Fitness Evaluation for Solving Optimization Problems With Only Fuzzy Fitness Information // *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*. 2023. Vol. 31. No. 11. Pp. 3995-4009. DOI: 10.1109/tfuzz.2023.3273308

29. Kóczy L.T. Discrete Bacterial Memetic Evolutionary Algorithms for Solving High Complexity Problems: PLENARY TALK // 2022 IEEE 16th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI), Timisoara, Romania. 2022. Pp. 13-14. DOI: 10.1109/SACI55618.2022.9919503

30. Aishwaryaprajna, Rowe J.E. (2021). Evolutionary Algorithms for Solving Unconstrained, Constrained and Multi-objective Noisy Combinatorial Optimisation Problems. URL: <https://arxiv.org/abs/2110.02288v1> (дата обращения: 09.01.2025).

31. Xiaoyong Li. Logical Programming and Humor Language in the Open AI Environment of Natural Democracy. 2023. DOI: 10.31219/osf.io/3ux4n

32. Shakarian P., Simari G.I., Callahan D. Reasoning about Complex Networks: A Logic Programming Approach. URL: <https://arxiv.org/abs/2209.15067v1> (дата обращения: 09.01.2025).

33. Lancia G., Serafini P. Computational Complexity and ILP Models for Pattern Problems in the Logical Analysis of Data // *Algorithms*. 2021. Vol. 14(8). P. 235. DOI: 10.3390/A14080235

34. Pan L., Albalak A., Wang X. Logic-LM: Empowering Large Language Models with Symbolic Solvers for Faithful Logical Reasoning. URL: <https://arxiv.org/abs/2305.12295v2> (дата обращения: 09.01.2025).

35. Tymoshenko P., Zasoba Y., Kovalchuk O. et al. Neuroevolutionary algorithms for neural networks generating // *Herald of Khmelnytskyi National University Technical sciences*. 2022. Vol. 315(6(1)). Pp. 240-244. DOI: 10.31891/2307-5732-2022-315-6-240-244

36. Chalumeau F., Boige R., Lim B. et al. Neuroevolution is a Competitive Alternative to Reinforcement Learning for Skill Discovery. URL: <https://arxiv.org/abs/2210.03516v4> (дата обращения: 09.01.2025).

37. Rodzin S., Bova V., Kravchenko Y. et al. Deep Learning Techniques for Natural Language Processing / In: *Artificial Intelligence Trends in Systems, Proceedings of 11th Computer Science On-line Conference 2022*, Vol. 2. 2022. Pp. 121-130. DOI: 10.1007/978-3-031-09076-9\_11

38. Курейчик В.В., Родзин С.И., Бова В.В. Методы глубокого обучения для обработки текстов на естественном языке // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2022. №2 (226). С. 189-199. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-glubokogo-obucheniya-dlya-obrabotki-tekstov-na-estestvennom-yazyke> (дата обращения: 16.02.2024).

39. Частикова В.А., Козачек К.В., Гуляй В.Г. Методы обработки естественного языка в решении задач обнаружения атак социальной инженерии // *Вестник Адыгейского государственного университета. Сер.: Естественные математические и технические науки*. 2021. Вып. 4(291). DOI: 10.53598/2410-3225-2021-4-291-95-108

40. Khot T., Richardson K., Khashabi D. et al. (2021). Learning to Solve Complex Tasks by Talking to Agents. URL: <https://arxiv.org/abs/2110.08542v2> (дата обращения: 09.01.2025).
41. Wang H., Feng S., He T. et al. Can Language Models Solve Graph Problems in Natural Language? URL: <https://arxiv.org/abs/2305.10037v3> (дата обращения: 09.01.2025).
42. Vetter D., Tithi J.J., Westerlund M. et al. Using Sentence Embeddings and Semantic Similarity for Seeking Consensus when Assessing Trustworthy AI. URL: <https://arxiv.org/abs/2208.04608v1> (дата обращения: 09.01.2025).
43. Massri M.B., Spahiu B., Grobelsnik M. et al. Towards InnoGraph: A Knowledge Graph for AI Innovation // WWW '23 Companion: Companion Proceedings of the ACM Web Conference 2023. Pp. 843-849. DOI: 10.1145/3543873.3587614
44. Dadure P., Pakray P., Bandyopadhyay S. Challenges and Opportunities in Knowledge Representation and Reasoning / In: J. Wang (ed.). Encyclopedia of Data Science and Machine Learning (5 volumes). 2023. Volume IV. Pp. 2464-2478. DOI: 10.4018/978-1-7998-9220-5.ch148
45. Beishui L. On Interdisciplinary Studies of a New Generation of Artificial Intelligence and Logic // Social Sciences in China. 2022. Vol. 43(3). Pp. 21-42. DOI: 10.1080/02529203.2022.2122207
46. Dignum V., Casey D., Serratto-Pragman T. et al. On the importance of AI research beyond disciplines. URL: <https://arxiv.org/abs/2302.06655v1> (дата обращения: 09.01.2025).
47. Елкин С.В., Гаврилов Д.А. Смыслы и симметрии в системе языка Диал // Научная сессия МИФИ-98: Сб. науч. тр. в 11 ч. Ч. 5. М.: МГИФИ, 1998. С. 31-34.
48. Куликов В.В., Гаврилов Д.А., Елкин С.В. Универсальный искусственный язык – «hOOM-Диал»: Методические указания для изучающих язык. М.: Гэлэкси Нэйшн, 1994. 113 с.
49. Елкин С.В., Гаврилов Д.А. Универсальный искусственный язык Диал как интерфейс // V Международный форум по информатизации. Материалы Конгресса «Общественное развитие и общественная информация», секция: Информатизация постперестроечного общественного развития. МАИ, 20-23 ноября 1996 г. М.: МАИ, 1996. С. 51-53.
50. Куликов В.В. Узник бессмертия: обучающий роман в жанре научной фантастики. М.: СИНТЕК, 1998. 100 с.
51. Альтшуллер Г. Найти идею. Введение в ТРИЗ – теорию решения изобретательских задач. М.: Альпина паблишер, 2022. 408 с.
52. A market research on challenges influencing artificial intelligence adoption. Business: Theory and Practice, (2023). doi: 10.3846/btp.2023.17655
53. Hoffman R., Miller T., Clancey W. Psychology and AI at a Crossroads: How Might Complex Systems Explain Themselves? // American Journal of Psychology. 2022. Vol. 135(4). Pp. 365-378. DOI: 10.5406/19398298.135.4.01
54. Repede S.E. Researching disinformation using artificial intelligence techniques: challenges // Bulletin of "Carol I" National Defense University. 2023. Vol. 12(2). Pp. 69-85. DOI: 10.53477/2284-9378-23-21
55. Birhane A. Automating Ambiguity: Challenges and Pitfalls of Artificial Intelligence. URL: <https://arxiv.org/abs/2206.04179v1> (дата обращения: 09.01.2025).
56. Gaud D. Ethical Considerations for the Use of AI Language Model // International Journal For Research in Applied Science and Engineering Technology. 2023. Vol. 11. Issue VII. doi: 10.22214/ijraset.2023.54513
57. Almazrouie O. Ethical implications of artificial intelligence in healthcare // International journal of advanced research (IJAR). 2023. Vol. 11(03). Pp. 446-448. DOI: 10.21474/ijar01/16444
58. Adah W.A., Ikumapayi N.A., Muhammed H.B. The Ethical Implications of Advanced Artificial General Intelligence: Ensuring Responsible AI Development and Deployment. URL: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=4457301](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4457301) (дата обращения: 09.01.2025).
59. Kamila M.K., Jasrotia S.S. Ethical issues in the development of artificial intelligence: recognizing the risks. URL: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ijoes-05-2023-0107/full/html> (дата обращения: 09.01.2025).
60. Talukdar J., Singh T., Barman B. Ethics of Intelligence. 2023. DOI: 10.1007/978-981-99-3157-6\_12
61. Hu M.Y., Yuan F. Legal regulation of clinical application of artificial intelligence // National Medical Journal of China. 2023. Vol. 103(18). Pp. 1363-1366. DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20230217-00227
62. Шахназаров Б.А. Правовое регулирование отношений с использованием искусственного интеллекта // Актуальные проблемы российского права. 2022. № 17(9). С. 63-72. DOI: 10.17803/1994-1471.2022.142.9.063-072
63. Weissinger L.B. AI, Complexity, and Regulation / In: J.B. Bullock (ed.) et al. The Oxford Handbook of AI Governance. Oxford University Press, 2022. Pp. 619-638. DOI: 10.1093/oxfordhb/9780197579329.013.66
64. Cuellar M-F., Huq A.Z. Artificially Intelligent Regulation // Daedalus. 2022. Vol. 151(2). Pp. 335-347. DOI: 10.1162/daed\_a\_01920
65. Матюк Ю.С. Правовое регулирование искусственного интеллекта: зарубежный опыт // Российский журнал правовых исследований. 2022. Т. 9. № 2. С. 107-115. DOI: 10.17816/RJLS91009
66. Lucaj L., van der Smagt P., Benbouzid D. (2023). AI Regulation Is (not) All You Need // FAccT '23: Proceedings of the 2023 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency. 2023. Pp. 1267-1279. DOI: 10.1145/3593013.3594079

## References

1. Mukherjee U.P. From Tafa to Robu: AI in the Fiction of Satyajit Ray. In: Imagining AI: How the World Sees Intelligent Machines. Oxford; 2023. DOI: 10.1093/oso/9780192865366.003.0015.
2. Moloi T., Marwala T. A High-Level Overview of Artificial Intelligence: Historical Overview and Emerging Developments. In: Artificial Intelligence and the Changing Nature

- of Corporations. Springer, Cham; 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-76313-8\_2.
3. Tencent Research Institute, CAICT, Tencent AI Lab., Tencent open platform. Artificial Intelligence's Past. In: Artificial Intelligence. Palgrave Macmillan, Singapore; 2021. DOI: 10.1007/978-981-15-6548-9\_2.
4. González de Posada F., González Redondo F.A., González A.H. Leonardo Torres Quevedo: Pioneer of Computing, Automatics, and Artificial Intelligence. *IEEE Annals of the History of Computing* 2021;43(3):22-43. DOI: 10.1109/MAHC.2021.3082199.
5. Bradshaw G.F., Langley P.W., Simon H.A. Studying scientific discovery by computer simulation. *Science* 1983;222(4627):971-975.
6. Schmidt M., Lipson H. Distilling free-form natural laws from experimental data. *Science* 2009;324:81-85.
7. Udrescu S.M., Tegmark M. AI Feynman: A physics-inspired method for symbolic regression. *Science Advances* 2020;6(16). DOI: 10.1126/sciadv.aay2631.
8. Chalmers D.J., French R.M., Hofstadter D.R. High-level perception, representation, and analogy: A critique of artificial intelligence methodology. *Journal of Experimental & Theoretical Artificial Intelligence* 1992;4:185-211.
9. GOST R 59277- 2020. Artificial intelligence systems. Classification of artificial intelligence systems. Moscow: Standartinform; 2021. (in Russ.)
10. Jumper J., Evans R., Pritzel A. et al. Highly accurate protein structure prediction with AlphaFold. *Nature* 2021;596:583-589.
11. Biswas A.K. Autonomous Intelligence in Problem-Solving by Searching in the field of Artificial Intelligence. *International journal of scientific research in science, engineering and technology* 2022;9(6). DOI: 10.32628/ijrsrset22962.
12. Azzam M., Beckmann R. How AI Helps to Increase Organizations' Capacity to Manage Complexity – A Research Perspective and Solution Approach Bridging Different Disciplines. *IEEE Transactions on Engineering Management* 2022;71:2324-2337. DOI: 10.1109/tem.2022.3179107.
13. Systematic Complex Problem Solving in the Age of Digitalization and Open Innovation. In: Cavallucci D., Brad S., Livotov P., editors. Proceedings of the 20th International TRIZ Future Conference (TFC 2020). Cluj-Napoca (Romania); October 14-16, 2020. Springer International Publishing; 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-61295-5.
14. Eppe M., Gumbsch C., Kerzel M. et al. Intelligent problem-solving as integrated hierarchical reinforcement learning. *Nature Machine Intelligence* 2022;4:11-20. DOI: 10.1038/s42256-021-00433-9.
15. De Arruda H.F., Comin C.H., Costa L. da F. Problem-solving using complex networks. *The European Physical Journal B: Condensed Matter and Complex Systems* 2019;92(6):1-9. DOI: 10.1140/EPJB/E2019-100100-8.
16. Xinxin Liu. Opportunities of artificial intelligence for supporting complex problem-solving: Findings from a scoping review. *Computers & Education: Artificial Intelligence* 2023;4:100138. DOI: 10.1016/j.caeai.2023.100138.
17. Wang S., Ji Y. A strategy of artificial intelligence with chemical fingerprinting to predict drug phase behaviors in complex systems. Preprint; 2023. DOI: 10.22541/au.168106505.57179711/v1.
18. Li X., Lin W., Guan B. The impact of computing and machine learning on complex problem □ solving. *Engineering reports* 2023;5(6). DOI: 10.1002/eng2.12702.
19. Li B., Wei Z., Wu J. et al. Machine Learning-enabled Globally Guaranteed Evolutionary Computation. *Nature Machine Intelligence* 2023;5:457-467. DOI: 10.1038/s42256-023-00642-4.
20. Zhang W. Machine Learning for Solving Unstructured Problems. In: Nakamori Y., editor. Knowledge Technology and Systems. Translational Systems Sciences. Vol 34. Springer (Singapore); 2023. DOI: 10.1007/978-981-99-1075-5\_4.
21. Suyal P., Dutt S., Sharma R. et al. (2022). An Agile Review of Machine Learning Technique. In: Proceedings of 2022 11th International Conference on System Modeling & Advancement in Research Trends (SMART); 16-17 December, 2022. Pp. 75-79. DOI: 10.1109/SMART55829.2022.10047305.
22. Douglass F. Deep Learning and Neural Networks: Methods and Applications. In: Shanmugam T., Bansal S.A., editors. Cutting-Edge Technologies In Innovations In Computer Science And Engineering. San International Scientific Publication; 2023. DOI: 10.59646/csebookc8/004.
23. Yamana Y. Deep Learning and Neural Networks: Methods. In: Shanmugam T., Bansal S.A., editors. Cutting-Edge Technologies In Innovations In Computer Science And Engineering. San International Scientific Publication; 2023. DOI: 10.59646/csebookc7/004.
24. Nguyen T.T., Nguyen C.M., Huynh-The T. et al. Solving Complex Sequential Decision-Making Problems by Deep Reinforcement Learning with Heuristic Rules. In: Proceedings of Computer Science – ICCS 2023: 23rd International Conference; Prague (Czech Republic); July 3–5, 2023. Part II. Pp. 298-305. DOI: 10.1007/978-3-031-36021-3\_30.
25. Pattanayak S. Mathematical Foundations. In: Pro Deep Learning with TensorFlow 2.0. Apress: Berkeley, CA; 2023. Pp. 1-108. DOI: 10.1007/978-1-4842-8931-0\_1.
26. Tian S.F., Li B. Gradient-optimized physics-informed neural networks (GOPINNs): a deep learning method for solving complex nonlinear problems. *Acta Phys. Sin.* 2023;72(10):100202. DOI: 10.7498/aps.72.20222381.
27. Gaspar-Cunha A., Costa P., Monaco F. et al. Scalability of Multi-objective Evolutionary Algorithms for Solving Real-World Complex Optimization Problems. In: Emmerich M. et al. Evolutionary Multi-Criterion Optimization. EMO 2023. Lecture Notes in Computer Science; Vol 13970. Springer, Cham; 2023. DOI: 10.1007/978-3-031-27250-9\_7.
28. Zhao X., Jia X., Zhang T. et al. Evolutionary Algorithms With Blind Fitness Evaluation for Solving Optimization Problems With Only Fuzzy Fitness Information. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 2023;31(11):3995-4009. DOI: 10.1109/tfuzz.2023.3273308.
29. Kóczy L.T. Discrete Bacterial Memetic Evolutionary Algorithms for Solving High Complexity Problems: PLENARY TALK. In: Proceedings of the 2022 IEEE 16th Inter-



national Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI), Timisoara (Romania); 2022. Pp. 13-14. DOI: 10.1109/SACI55618.2022.9919503.

30. Aishwaryaprajna, Rowe J.E. Evolutionary Algorithms for Solving Unconstrained, Constrained and Multi-objective Noisy Combinatorial Optimisation Problems. (accessed 09.01.2025). Available at: <https://arxiv.org/abs/2110.02288v1>.

31. Xiaoyong Li. Logical Programming and Humor Language in the Open AI Environment of Natural Democracy. 2023. DOI: 10.31219/osf.io/3ux4n.

32. Shakarian P., Simari G.I., Callahan D. Reasoning about Complex Networks: A Logic Programming Approach. (accessed 09.01.2025). Available at: <https://arxiv.org/abs/2209.15067v1>.

33. Lancia G., Serafini P. Computational Complexity and ILP Models for Pattern Problems in the Logical Analysis of Data. *Algorithms* 2021;14(8):235. DOI: 10.3390/A14080235.

34. Pan L., Albalak A., Wang X. Logic-LM: Empowering Large Language Models with Symbolic Solvers for Faithful Logical Reasoning. (accessed 09.01.2025). Available at: <https://arxiv.org/abs/2305.12295v2>.

35. Tymoshenko P., Zasoba Y., Kovalchuk O. et al. Neuroevolutionary algorithms for neural networks generating. *Herald of Khmelnytskyi National University Technical Sciences* 2022;315(6(1)):240-244. DOI: 10.31891/2307-5732-2022-315-6-240-244.

36. Chalumeau F., Boige R., Lim B. et al. Neuroevolution is a Competitive Alternative to Reinforcement Learning for Skill Discovery. (accessed 09.01.2025). Available at: <https://arxiv.org/abs/2210.03516v4>.

37. Rodzin S., Bova V., Kravchenko Y. et al. Deep Learning Techniques for Natural Language Processing. In: Proceedings of the 11-th Computer Science On-line Conference Artificial Intelligence Trends in Systems; 2022, Vol. 2. Pp. 121-130. DOI: 10.1007/978-3-031-09076-9\_11.

38. Kureichik V.V., Rodzin S.I., Bova V.V. Deep learning methods for natural language text processing. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences* 2022;2(226):189-199. (accessed 16.02.2024). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-glubokogo-obucheniya-dlya-obrabotki-tekstov-na-estestvennom-yazyke>.

39. Chastikova V.A., Kozachek K.V., Gulyay V.G. Methods of natural language processing in solving problems of detecting social engineering attacks. *Bulletin of the Adyghe State University, the series "Natural-Mathematical and Technical Sciences"* 2021;291. DOI: 10.53598/2410-3225-2021-4-291-95-108.

40. Khot T., Richardson K., Khashabi D. et al. Learning to Solve Complex Tasks by Talking to Agents. (accessed 09.01.2025). Available at: <https://arxiv.org/abs/2110.08542v2>.

41. Wang H., Feng S., He T. et al. Can Language Models Solve Graph Problems in Natural Language? (accessed 09.01.2025). Available at: <https://arxiv.org/abs/2305.10037v3>.

42. Vetter D., Tithi J.J., Westerlund M. et al. Using Sentence Embeddings and Semantic Similarity for Seeking Consensus when Assessing Trustworthy AI. (accessed 09.01.2025). Available at: <https://arxiv.org/abs/2208.04608v1>.

43. Massri M.B., Spahiu B., Grobelnik M. et al. Towards InnoGraph: A Knowledge Graph for AI Innovation. In: WWW '23 Companion: Companion Proceedings of the ACM Web Conference 2023. Pp. 843-849. DOI: 10.1145/3543873.3587614.

44. Dadure P., Pakray P., Bandyopadhyay S. Challenges and Opportunities in Knowledge Representation and Reasoning. In: J. Wang, editor. *Encyclopedia of Data Science and Machine Learning* (5 volumes) 2023; Volume IV. Pp. 2464-2478. DOI: 10.4018/978-1-7998-9220-5.ch148.

45. Beishui L. On Interdisciplinary Studies of a New Generation of Artificial Intelligence and Logic. *Social Sciences in China* 2022;43(3):21-42. DOI: 10.1080/02529203.2022.2122207.

46. Dignum V., Casey D., Serratto-Pragman T. et al. On the importance of AI research beyond disciplines. (accessed 09.01.2025). Available at: <https://arxiv.org/abs/2302.06655v1>.

47. Yolkin S.V., Gavrilov D.A. [Meanings and symmetries in the Dial language system]. [MEPhI-98 Scientific Session: Collection of science papers in 11 parts. Part 5]. Moscow: MGIFI; 1998. (in Russ.)

48. Kulikov V.V., Gavrilov D.A., Yolkin S.V. ["hOOM-Dial", a universal artificial language: Guidelines for language learners]. Moscow: Galaksi Neyshn; 1994. (in Russ.)

49. Yolkin S.V., Gavrilov D.A. [The Dial universal artificial language as an interface]. In: [Proceedings of the V International Information Technology Forum. Public Development and Public Information Congress. Information Technology of the Post-Perestroika Social Development Section]. MAI; November 20-23, 1996. Moscow: MAI; 1996. P. 51-53. (in Russ.)

50. Kulikov V.V. [The prisoner of immortality: an educational sci-fi novel]. Moscow: SINTEK; 1998. (in Russ.)

51. Altshuller G. [Finding an idea. Introduction to TRIZ, the theory of solving inventive problems]. Moscow: Alpina Publisher; 2022. (in Russ.)

52. Schmiegelow F., Melo F.C.L. A market research on challenges influencing artificial intelligence adoption. *Business: Theory and Practice* 2023;24(1):250-257. <https://doi.org/10.3846/btp.2023.17655>.

53. Hoffman R., Miller T., Clancey W. Psychology and AI at a Crossroads: How Might Complex Systems Explain Themselves? *American Journal of Psychology* 2022;135(4):365-378. DOI: 10.5406/19398298.135.4.01.

54. Repede S.E. Researching disinformation using artificial intelligence techniques: challenges. *Bulletin of "Carol I" National Defense University* 2023;12(2):69-85. DOI: 10.53477/2284-9378-23-21.

55. Birhane A. Automating Ambiguity: Challenges and Pitfalls of Artificial Intelligence. (accessed 09.01.2025). Available at: <https://arxiv.org/abs/2206.04179v1>.

56. Gaud D. Ethical Considerations for the Use of AI Language Model. *International Journal For Research in Applied Science and Engineering Technology* 2023;11(VII). doi: 10.22214/ijraset.2023.54513.

57. Almazrouie O. Ethical implications of artificial intelligence in healthcare. *International journal of advanced research (IJAR)* 2023;11(03):446-448. DOI: 10.21474/ijar01/16444.

58. Adah W.A., Ikumapayi N.A., Muhammed H.B. The Ethical Implications of Advanced Artificial General Intelligence: Ensuring Responsible AI Development and Deployment. (accessed 09.01.2025). Available at: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=4457301](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4457301).

59. Kamila M.K., Jasrotia S.S. Ethical issues in the development of artificial intelligence: recognizing the risks. (accessed 09.01.2025). Available at: <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/ijoes-05-2023-0107/full/html>.

60. Talukdar J., Singh T., Barman B. Ethics of Intelligence. 2023. DOI: 10.1007/978-981-99-3157-6\_12.

61. Hu M.Y., Yuan F. Legal regulation of clinical application of artificial intelligence. *National Medical Journal of China* 2023;103(18):1363-1366. DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20230217-00227.

62. Shakhnazarov B.A. Legal Regulation of Relations Using Artificial Intelligence. *Actual Problems of Russian Law* 2022;17(9):63-72. <https://doi.org/10.17803/1994-1471.2022.142.9.063-072>. (in Russ.)

63. Weissinger L.B. AI, Complexity, and Regulation. In: J.B. Bullock et al., editors. *The Oxford Handbook of AI Governance*. Oxford University Press; 2022. Pp. 619-638. DOI: 10.1093/oxfordhb/9780197579329.013.66.

64. Cuellar M-F., Huq A.Z. Artificially Intelligent Regulation. *Daedalus* 2022;151(2):335-347. DOI: 10.1162/daed\_a\_01920.

65. Matyuk Y.S. Legal Regulation of Artificial Intelligence: Foreign Practices. *Russian Journal of Legal Studies* 2022;9(2):107-115. DOI: 10.17816/RJLS91009. (in Russ.)

66. Lucaj L., van der Smagt P., Benbouzid D. AI Regulation Is (not) All You Need. In: FAccT '23: Proceedings of the 2023 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency; 2023. Pp. 1267-1279. DOI: 10.1145/3593013.3594079.

## Сведения об авторе

Бочкова Александра Александровна, студентка 2 курса Факультета бизнес-информатики и управления комплексными системами, Специальность: системный анализ (27.03.03), направление подготовки: системный аналитик в компаниях, связанных с разработкой интеллектуальных автоматизированных систем (от технического задания до архитектуры), НИЯУ МИФИ, Каширское ш., 31, Москва, 115409, e-mail: aabochkova@gmail.com

## About the author

**Alexandra A. Bochkova**, 2-nd year student, Faculty for Business Informatics and Integrated Systems Management, Major: system analysis (27.03.03), Program track: system analyst in companies involved in the development of intelligent automated systems (from specification to architecture), NRNU MEPhI, 31 Kashirskoye shosse, Moscow, 115409, e-mail: aabochkova@gmail.com.

## Вклад автора в статью

Автором выполнена постановка задачи исследования, проведен поиск публикаций в выбранной области знаний, их анализ и систематизация и реферирование. На основе выполненных обобщений сформулированы ключевые проблемы в применении средств и методов ИИ при решении сложных задач, а также выработаны рекомендации по развитию перспективных подходов.

## Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

# Методика оценки функциональной надежности компонент программно-аппаратной встраиваемой микропроцессорной системы управления

## A methodology for evaluating the functional dependability of the components of an embedded software and hardware microprocessor-based control system

Климов С.М.<sup>1</sup>, Сосновский Ю.В.<sup>2</sup>, Чачиев Д.Р.<sup>2</sup>  
Klimov S.M., Sosnovskiy Yu.V., Chachiev D.R.

<sup>1</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>2</sup>Физико-технический институт Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского, Симферополь, Россия

<sup>1</sup>Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>Physics and Technology Institute, Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky, Simferopol, Russian Federation  
\*yuri.sosnovskij@yandex.ru



Климов С.М.



Сосновский Ю.В.



Чачиев Д.Р.

**Резюме. Цель.** Выполнить анализ терминологии надежности применительно к встраиваемым программно-аппаратным системам, разработать методику оценки функциональной надежности компонентов программно-аппаратной встраиваемой микропроцессорной системы управления и провести практическую оценку надежности актуальных на сегодняшний день программно-аппаратных компонент уровня встраиваемого компьютера и микроконтроллера для выбора оптимальной структуры системы управления. В качестве объекта управления используется опытный образец медицинского робота, выполняющего функции удержания хирургических инструментов, ранорасширителей по Фараберу и пр. В состав системы робота входит микропроцессорный блок на распространенном одноплатном компьютере, реализующий высокоуровневые функции управления и распознавания голосовых команд, дополнительный микропроцессорный блок для управления сервоприводами и получения входных сигналов, а также исполнительные модули – приводы. **Методы.** В статье применяются методы анализа библиографических источников, выполнен анализ нерецензируемых сборников документов, ранее закрытых иностранных стандартов и публикаций. **Результаты.** Представлена методика оценки функциональной надежности компонентов программно-аппаратной встраиваемой микропроцессорной системы управления. Выполнен расчет вероятности безотказной работы программных и аппаратных компонент рассматриваемой системы по статистическим оценкам и по объему кода. Несмотря на различные методы расчета и справочные данные, результаты в целом близки. Также выполнена оценка вероятности безотказной работы программных средств для альтернативной структуры системы управления, когда часть важных функций разделена с дополнительным программно-аппаратным блоком, имеющим более высокий уровень надежности. В данном случае таким блоком является микроконтроллер Atmega32, который будет обеспечивать непосредственное управление работой приводов. Сравнительный анализ результатов показывает, что за счет внедрения дополнительного уровня с частичным распараллеливанием функций и частичным резервированием каналов управления была значительно повышена оценка вероятности безотказной работы системы в заданных условиях. На основании расчетов сформирована структура системы управления с двумя системными уровнями, обладающая высокими значениями вероятности безотказной работы. **Заключение.** С учетом тенденции к интеграции максимального числа функций в единую микропроцессорную систему, для повышения функциональной надежности предпочтительной схемой является двухуровневое структурное представление функциональной схемы, при котором ключевые задачи в части непосредственной работы с аппаратным окружением перераспределяются в пользу отдельного аппаратного модуля. Кроме того, в рамках встраиваемых систем такой подход часто позволяет выделить нижний системный уровень, работающий в режиме реального времени и верхний системный уровень, отвечающий за высокоуровневые функции, такие как распознавание речи, передачу данных посредством коммуникационных интерфейсов и реализацию функций искусственного интеллекта. Не до конца решенным является вопрос практической оценки надежности встраиваемого программного обеспечения, особенностью которого является отсутствие виртуализации и уровня аппаратной абстракции и, как следствие, тесная взаимосвязь с аппаратной частью и периферией. Очевидно, что



во время испытаний недостаточно многократно повторять соответствующие испытания, а целесообразно формировать тестовые комбинации из внешних аппаратных воздействий (аномалий сигнального уровня) и программных воздействий на периферию микроконтроллера.

**Abstract. Aim.** To analyse the dependability terminology as regards embedded software and hardware systems, to develop a methodology for assessing the functional dependability of the components of embedded software and hardware computer-based control systems, and to conduct a practical assessment of the dependability of the modern software and hardware components of embedded computers and microcontrollers for the purpose of selecting the optimal control system architecture. A prototype medical robot intended for holding surgical instruments, Farabeuf retractors, etc. is used as the controllable object. The robotics system includes a microprocessor unit based on a common single-board computer that implements high-level control and voice command recognition functions, an additional microprocessor unit for controlling servo drives and receiving input signals, as well as the actuating modules, i.e., drives. **Methods.** The paper uses reference source analysis, analyses non-peer-reviewed collections of documents, previously restricted foreign standards and publications. **Results.** The author presents a method for assessing the functional dependability of the components of an embedded software and hardware control system. The probability of no failure of software and hardware components of the examined system was calculated based on statistical estimates and on the amount of code. Despite the different calculation methods and reference data, the results are generally close. The paper also estimated the probability of no software failure for an alternative control system architecture, whereas a part of important functions is shared with an additional software and hardware unit having a higher level of dependability. In this case, such is an Atmega32 microcontroller that is to directly control the drives. A comparative analysis of the results shows that the additional level with partially parallelised functions and partial control channel redundancy significantly improved the assessment of the system's probability of no failure under predefined conditions. Based on the calculated data, the paper defines a control system architecture with two system levels that has high values of probability of no failure. **Conclusion.** Given the trend of growing numbers of functions being integrated within a single microprocessor-based system, improved functional dependability should be achieved through a two-level functional architectural solution, whereas the key tasks in terms of direct interaction with the hardware environment are redistributed in favour of a separate hardware module. Additionally, as regards embedded systems, such an approach often allows defining a lower, real-time system layer and an upper system layer that is responsible for high-level functions such as speech recognition, data communication via interfaces, and artificial intelligence. The matter of practical evaluation of embedded software dependability is not yet completely resolved. Such software is characterised by the lack of virtualisation and a level of hardware abstraction, which, in turn, causes a close relationship with the hardware and peripherals. Obviously, repeating the required tests is not enough. Test combinations should include external hardware effects (signal level anomalies) and software effects on the periphery of a microcontroller.

**Ключевые слова:** программно-аппаратные системы, встраиваемые системы, функциональная надежность.

**Keywords:** software and hardware systems, embedded systems, functional dependability.

**Для цитирования:** Климов С.М., Сосновский Ю.В., Чачиев Д.Р. Методика оценки функциональной надежности компонент программно-аппаратной встраиваемой микропроцессорной системы управления // Надежность. 2025. №1. С. 58-66. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-1-58-66>

**For citation:** Klimov S.M., Sosnovskiy Yu.V., Chachiev D.R. A methodology for evaluating the functional dependability of the components of an embedded software and hardware microprocessor-based control system. *Dependability* 2025;1:58-66. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-1-58-66>

**Поступила:** 11.10.2024 / **После доработки:** 18.11.2024 / **К печати:** 05.03.2025

**Received on:** 11.10.2024 / **Revised on:** 18.11.2024 / **For printing:** 05.03.2025

## Введение

Встраиваемые системы активно развиваются как в сфере гражданского, так и специального назначения. Например, роботизированные ассистенты хирурга, которые помогают выполнять операции точнее и быстрее. В связи с миниатюризацией и удешевлением таких компонент, как система на кристалле (SoC, systemonchip) наблюдается процесс децентрализации обработки информации нижнего системного уровня [1], в конечной ситуации заключающийся в том, что в отдельные манипуляторы, датчики, исполнительные устройства встраивается собственная микропроцессорная система управления (МСУ) [2].

Таким образом, комплекс факторов определяет постоянное усложнение встраиваемых микропроцессорных систем. Отмечается быстрое внедрение принципов объектно-ориентированного программирования в разработку встраиваемого программного обеспечения и в АСУ ТП, что определяет гиперэкспоненциальный рост внутренней сложности, прежде всего, программных средств встраиваемых систем.

Особенность рассматриваемых программно-аппаратных встраиваемых систем состоит в том, что программное обеспечение (ПО) имеет большой объем, тесно связано с аппаратной частью и работает с периферией непосредственно.

В этой области существует определенная несогласованность мнений ведущих экспертов и документов в части определений компонент надежности, таких как функциональная<sup>1</sup> [3, 4], структурная [5], эксплуатационная, программная и аппаратная надежность.

Цель работы – разработка методики оценки функциональной надежности компонентов программно-аппаратной встраиваемой микропроцессорной системы управления и практическая оценка надежности актуальных на сегодняшний день программно-аппаратных компонент уровня встраиваемого компьютера и микроконтроллера для выбора оптимальной структуры системы управления.

## 1. Анализ состояния терминологии в области надежности встраиваемых систем

Вопросы, связанные с терминологией в области надежности, ставятся постоянно [6, 7], в том числе о терминологии надежности в области программного обеспечения [8]. Это объяснялось необходимостью обновления основного стандарта «Надежность в технике», определяющего терминологию в данной области, и необходимостью согласования основных используемых терминов с международными стандар-

тами. Данный стандарт был обновлен, однако он не снял ряд вопросов.

Проблемы в основном возникают у специалистов, изучающих вопросы надежности информационных систем (ИС) в части их программной компоненты.

Стоит отметить определения д.т.н., профессора, официального эксперта Научного совета по информационной безопасности Совета Безопасности РФ Шубинского И.Б.: «функциональная надежность информационных систем в значительной мере зависит от надежности программных средств. Все принципы и методы обеспечения функциональной надежности программ, в соответствии с их целью, можно разделить на четыре группы: предупреждение ошибок, обнаружение ошибок, исправление ошибок и обеспечение устойчивости к ошибкам» [9]. Таким образом, надежность программных средств определяется как основа функциональной надежности.

Также следует выделить подробный анализ определения и содержания понятия объекта в надежности, выполненный д.т.н., профессором Нетесом В.А. В частности, было предложено уточнение понятия «объект»<sup>2</sup> как предмет рассмотрения, который наряду с аппаратными средствами может включать в себя программное обеспечение, необходимое для его функционирования [10].

В то же время, в ситуации программно-аппаратных комплексов степень взаимного влияния их составляющих – программного, аппаратного обеспечения, коммуникационных каналов – становится настолько сильной, что на показатели надежности программных средств влияет, в том числе, недеklarированное поведение подсистем передачи данных и подсистем защиты от информационно-технических воздействий нарушителя (ИТВ).

Таким образом, формально функциональная надежность может быть снижена за счет частичного отказа компонент системы и т. д. В то же время информационная система в целом будет укладываться в требования технического задания по обеспечению основных своих функциональных характеристик за счет активных процессов восстановления, выполняемых встраиваемым программным обеспечением в автоматическом режиме.

Учитывая сложность определения и расчета параметров функциональной надежности гетерогенных информационных встраиваемых систем, на основе работ Шубинского И.Б., Нетеса В.А. и др., становится целесообразным определение понятия «информационная надежность» для встраиваемых программно-аппаратных микропроцессорных систем, часто относимых и к распределенным системам, которое характеризует степень соответствия основных показателей надежности системы тем, которые заложены в техническом задании или технических требованиях к гетерогенной информационной встраиваемой системе.

<sup>1</sup> ГОСТ Р 56205-2014 IEC/TS 62443-1-1:2009 Сети коммуникационные промышленные. Защищенность (кибербезопасность) сети и системы. Часть 1-1. Терминология, концептуальные положения и модели.

<sup>2</sup> ГОСТ 27.002 2015 – устарел, взамен введен ГОСТ Р 27.102-2021 Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения.

## 2. Методика оценки функциональной надежности компонент программно-аппаратной встраиваемой микропроцессорной системы управления

Методика оценки функциональной надежности компонент включает в свой состав четыре основных этапа, от анализа угроз компьютерных атак на компоненты до интерпретации результатов оценки надежности компонент встраиваемой программно-аппаратной системы.

**1. Разработка модели функционирования микропроцессорной системы управления.** Оценка рисков успешных ИТВ может выполняться на стендовом полигоне, позволяющем создать требуемые тестовые условия для работы функциональных аналогов МСУ, элементов СОПКА и имитации ИТВ.

Модель функционирования МСУ в условиях ИТВ, которая позволяет проводить комплексный анализ взаимосвязанных процессов функционирования МСУ, реализации ИТВ и ликвидации их последствий, в терминах расширенной сети Петри представлена в [11]. В разработанной модели предполагается, что МСУ оснащена коммуникационной подсистемой. Коммуникационная подсистема выполняет такие функции, как взаимодействие с промышленными системами более высокого уровня, удаленное считывание данных с датчиков и запись их значений в исполнительные устройства посредством сетевых интерфейсов.

В тоже время, для изолированной МСУ на первое место выходят требования к собственной функциональной надежности без учета внешних воздействий.

**2. Показатели оценки функциональной надежности компонентов программно-аппаратной встраиваемой МСУ.** Показатели оценки функциональной надежности МСУ могут определяться:

- эмпирически, на основе структурно-параметрического анализа особенностей построения, динамики функционирования и уязвимостей МСУ;

- экспериментально, на основании частоты успешно реализованных угроз ИТВ нарушителя, а также экспериментально на основе обработки большого массива данных по отказам аппаратных и программных средств. Подобный метод доступен производителям оборудования, результаты таких оценок доступны для некоторых аппаратных компонент. Установленные показатели надежности экстраполируются на весь жизненный цикл МСУ посредством введения динамической поправки, основанной на функции риска с использованием распределения Вейбулла-Гнеденко<sup>1</sup>, а также [12].

Вычисление вероятности сбоев при передаче данных между элементами функционирования возможно осуществлять согласно [13]:

- вычисление вероятности того, что произойдет  $w_{pj}$  реальных сбоев при передаче данных между элементами

функционирования за время  $t_{спд}$  в  $j$ -м потоке передаче данных:

$$P_{спд}^{сбр}(w_{pj}) = \prod_{j=1}^k e^{-t_{спд}^{сбр} P_{спд}^{сбр} / \Delta t_{спд}} P_{спд}^{сбр w_{pj}},$$

где  $w_{pj}$  – число реальных сбоев в средствах передачи данных;

$t_{спд}^{сбр}$  – время, за которое происходит сбой в средствах передачи данных;

$P_{спд}^{сбр}$  – вероятность возникновения реального сбоя в  $j$ -м средстве передачи данных;

$\Delta t_{спд}$  – среднее время передачи данных между элементами объектов МСУ;

$k$  – число средств передачи данных.

- вычисление вероятности того, что произойдет  $w_{dj}$  дополнительных (искусственно организованных) сбоев при передаче данных между элементами объектов МСУ за время  $t_{спд}$  в  $j$ -м потоке передачи данных:

$$P_{спд}^{д}(w_{dj}) = \prod_{j=1}^k e^{-t_{спд}^{д} P_{спд}^{д} / \Delta t_{спд}} P_{спд}^{д w_{dj}},$$

где  $w_{dj}$  – число дополнительных сбоев в средствах передачи данных;

$P_{спд}^{д}$  – вероятность возникновения дополнительного сбоя в  $j$ -м средстве передачи данных.

Оценка вероятности успешной передачи данных между элементами объектов МСУ осуществляется с использованием приведенных выше выражений.

$$P_{успд} = \frac{1}{N_w} \sum_{j=1}^{N_w} U_{P_{успд}}(w_{pj}, w_{dj}) \frac{\prod_{j=1}^k e^{-t_{спд}^{сбр} P_{спд}^{сбр} / \Delta t_{спд}} P_{спд}^{сбр w_{pj}}}{\prod_{j=1}^k e^{-t_{спд}^{д} P_{спд}^{д} / \Delta t_{спд}} P_{спд}^{д w_{dj}}},$$

где  $N_w$  – количество инструментальных оценок на стендовом полигоне с реализацией векторов сбоев  $w_{pj}$  и  $w_{dj}$ ;

$U_{P_{успд}}(w_{pj}, w_{dj})$  – индикаторная функция, принимающая значение 1, если событие соответствует показателю  $P_{успд}$ , и 0 в противном случае.

**3. Подготовка исходных данных для выполнения оценки функциональной надежности программно-аппаратных компонент МСУ.** Исходные данные для эмпирической оценки собственной функциональной надежности программно-аппаратных компонент МСУ могут быть получены из ряда источников, таких как:

- данные Интернет-ресурсов, специализирующихся на анализе надежности аппаратных и программных средств;

- данные производителей, приводящих значения типовых показателей, таких как: MTTF (Mean Time to Failure); MTBF (Mean Time Between Failures); чаще для программного обеспечения может приводиться MTTD (Mean Time to Detection); MTTR (Mean Time to Recovery).

Несмотря на то, что для сложных программных систем, которые опираются на комплексное ПО, нет единого стандарта прогнозирования отказов [14], существует ряд методов, позволяющих получить приблизительные оценки отказов и, как следствие – надежности.

<sup>1</sup> ГОСТ Р 50779.27-2017 «Статистические методы. Распределение Вейбулла. Анализ данных»



Таким образом, используя один из методов, основанный на зависимости статистических показателей интенсивности отказов от объема ПО с применением модели Джелинского-Моранды [15], можно оценить интенсивность отказов программного комплекса  $\lambda_{\text{ПО}}$

$$\lambda_{\text{ПО}} = \lambda \cdot K_p \cdot K_k \cdot K_z \cdot K_n,$$

где  $\lambda$  – интенсивность отказов разработанного ПО;

$K_p$  – коэффициент, отражающий влияние времени работы ПО;

$K_k$  – коэффициент, отражающий качество разработанного ПО;

$K_z$  – коэффициент, отражающий ремонтпригодность и частоту модернизаций разработанного ПО;

$K_n$  – коэффициент, отражающий загруженность и пользовательские изменения разработанного ПО.

В общем виде зависимость интенсивности отказов от объема ПО приведена в табл. 1.

Табл. 1. Зависимость интенсивности отказов от объема ПО

| Тип управляющего ПО                | Размер процессора | Объем ПО, Мб | $\lambda \cdot 10^{-6}$<br>ч <sup>-1</sup> |
|------------------------------------|-------------------|--------------|--------------------------------------------|
| Элементарная управляющая программа | С                 | 0,25-1       | 0,4                                        |
| Базовая управляющая программа      | С                 | 1,4-4,0      | 1,5                                        |
| Расширенная управляющая программа  | С                 | 4,0-16       | 6                                          |
| Базовая операционная система       | С                 | 16-64        | 25                                         |
| Расширенная ОС                     | С                 | 64-256       | 100                                        |
| Управляющая программа              | М                 | 4-16         | 25                                         |
| ОС с малыми возможностями          | М/С               | 16-64        | 25                                         |
| Универсальная ОС                   | С/Б               | 256+         | 100                                        |

**4. Интерпретация результатов оценки компонентов программно-аппаратной встроенной МСУ.** При анализе функциональной надежности в условиях ИТВ формой экспериментальной оценки может быть вычис-

лительный эксперимент, проведенный с использованием стендового полигона, позволяющего создать требуемые тестовые условия для работы функциональных аналогов МСУ, элементов СОПКА и имитации ИТВ.

В случае анализа функциональной надежности программно-аппаратных компонент изолированной МСУ анализ функциональной надежности без учета факторов ИТВ целесообразно проводить на основании эмпирических данных. При этом в обязательном порядке требуется как оценка надежности аппаратной части с учетом структурной схемы соединения блоков, так и оценка надежности программного обеспечения.

Ниже приводится пример реализации представленной методики, которая включает в себя расчет основных компонент функциональной надежности – аппаратной и программной, для реальной гетерогенной по составу уровней встраиваемой системы управления на распространенном одноплатном компьютере RaspberryPi и компоненте нижнего системного уровня на микроконтроллере ATmega32. Ввиду отсутствия подсистем виртуализации в данной реализации нижнего системного уровня, имеются предпосылки к тому, чтобы она обладала более высоким уровнем надежности [9, 16].

Приведенная микропроцессорная система управления разрабатывается как система управления специализированным медицинским роботом, выполняющим функции удержания хирургических инструментов, ранорасширителей по Фараберу и пр. В состав системы входят следующие компоненты: микропроцессорный блок на распространенном одноплатном компьютере, реализующий высокоуровневые функции управления и распознавания голосовых команд, дополнительный микропроцессорный блок для управления сервоприводами и получения входных сигналов, а также исполнительные модули – приводы.

1) *Разработка модели функционирования микропроцессорной системы управления.* С учетом документа<sup>1</sup>, формализация информационных процессов в микропроцессорной системе управления медицинским роботом в виде последовательной схемы показана на рис. 1.

<sup>1</sup> ГОСТ Р МЭК 61078-2021 Надежность в технике. Структурная схема надежности



Рис. 1. Последовательная структура встраиваемой микропроцессорной системы управления медицинским роботом

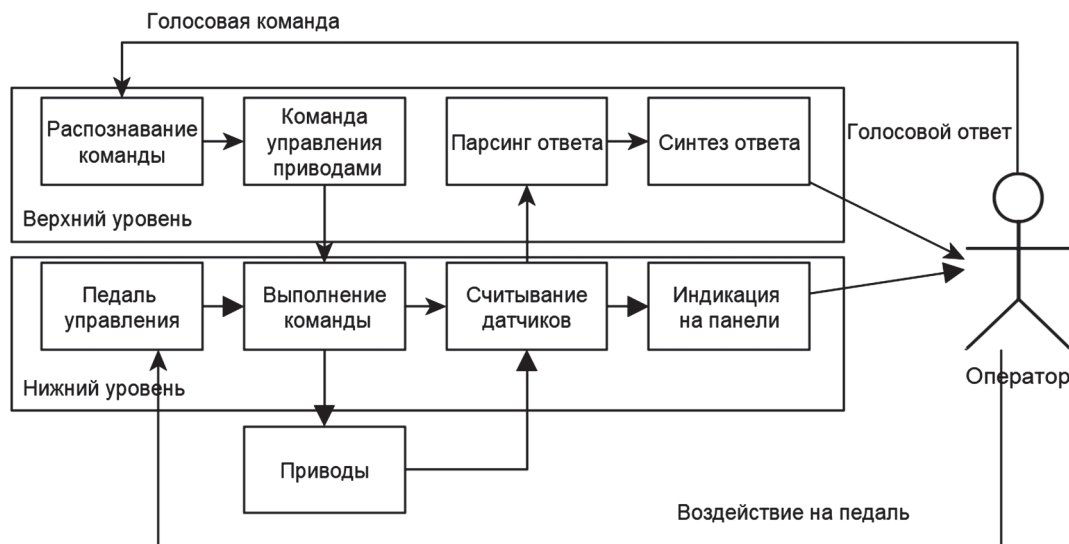


Рисунок 2. Структура системы с двумя уровнями

При такой структуре надежность всей системы является произведением компонент надежности  $P_{\text{ПО}} = \prod_i P_{\text{БЛР}}$ , где  $P_{\text{ПО}}$  – вероятность безотказной работы программной системы в течение заданного времени,  $P_{\text{БЛ}}$  – вероятность безотказной работы каждого ( $i$ -го) блока при аналогичных условиях.

Также необходимо учесть, что работоспособность всей системы зависит от работоспособности аппаратной части системы, поэтому  $P_{\text{СИСТ}} = P_{\text{ПО}} \cdot P_{\text{АО}}$ , где  $P_{\text{СИСТ}}$  – вероятность безотказной работы системы,  $P_{\text{АО}}$  – вероятность безотказной работы аппаратной части.

Альтернативная структурная схема МСУ с двумя уровнями, реализованная с использованием дополнительного модуля на микроконтроллере ATmega32 показана на рис. 2.

В качестве аппаратного обеспечения для расчетов выбран одноплатный компьютер RaspberryPi 4B.

2) *Показатели оценки функциональной надежности компонентов программно-аппаратной встраиваемой МСУ.* В данной работе в качестве показателя функциональной надежности программно-аппаратных компонент МСУ принимается вероятность безотказной работы в течение заданного промежутка времени.

3) *Подготовка исходных данных для выполнения оценки функциональной надежности программно-аппаратных компонент МСУ.* Из данных по надежности выбранного одноплатного компьютера Raspberry Pi 4B<sup>1</sup> известно, что среднее время между сбоями ( $MTBF$ ) равно 27 тысяч часов, а интенсивность отказов  $\lambda$  равна  $37 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ . По данным сборника документов<sup>2</sup>, интенсивность отказов выбранных исполнительных устройств можно оценить как  $\lambda = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ .

Вероятность безотказной работы аппаратной части в течение заданного промежутка времени вычисляет-

ся на основе экспоненциальной модели надежности, тогда для времени работы системы 12 ч вероятность безотказной работы одноплатного компьютера равна 0,9995, а вероятность безотказной работы приводов, используемых для фиксации подвижных элементов робота – 0,9999.

Используя метод, основанный на зависимости статистических показателей интенсивности отказов от объема ПО с применением модели Джелинско-Моранды, интенсивность отказов операционной системы одноплатного компьютера оценивается как  $\lambda_{\text{ОС}} = 100 \cdot 10^{-6} \cdot 0,5 \cdot 0,5 \cdot 1 \cdot 2 = 50 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ , а интенсивность отказов модулей ПО  $\lambda_{\text{МОД}} = 25 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot 2 \cdot 0,5 \cdot 2 = 100 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}$ . Также, в качестве метода оценки надежности ПО возможно использовать количественную оценку, основанную на объеме ПО и типе языка программирования. Итоговые значения вероятности безотказной работы модулей системы управления с оценкой по статистическим показателям и по объему кода для операционной системы ( $P_{\text{ОС}}$ ), программных модулей ( $P_{\text{МОД}}$ ) и всей системы ( $P_{\text{СИСТ}}$ ), приведены в табл. 2.

Табл. 2. Оценка вероятности безотказной работы при заданных условиях

| Параметр          | Оценка по статистическим показателям | Оценка по объему кода |
|-------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| $P_{\text{ОС}}$   | 0,9994                               | 0,9990                |
| $P_{\text{МОД}}$  | 0,9988                               | 0,9994                |
| $P_{\text{СИСТ}}$ | 0,9952                               | 0,9966                |

В качестве альтернативы был выполнен расчет вероятности безотказной работы программных средств для структуры, когда часть важных функций разделена с дополнительным программно-аппаратным блоком, имеющим более высокий уровень надежности. В данном случае таким блоком является микроконтроллер (МК) Atmega32, который будет обеспечивать непо-

<sup>1</sup> По данным электронного ресурса Reliability

<sup>2</sup> Интенсивность отказов элементов справочник URL: <https://areliability.com/intensivnost-otkazov-elementov-spravochnik>

Табл. 3. Оценки вероятности безотказной работы

| Вероятность безотказной работы | Одноуровневая система                |                       | Двухуровневая система                |                       |
|--------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|-----------------------|
|                                | Оценка по статистическим показателям | Оценка по объему кода | Оценка по статистическим показателям | Оценка по объему кода |
| $P_{RPI}$                      | 0,9995                               |                       |                                      |                       |
| $P_{OC}$                       | 0,9994                               | 0,9990                | 0,9994                               | 0,9990                |
| $P_{\text{мод}}$               | 0,9988                               | 0,9994                | 0,9994                               | 0,9990                |
| $P_{MK}$                       | -                                    | -                     | 0,999999                             |                       |
| $P_{MK \text{ мод}}$           | -                                    | -                     | 0,999997                             | 0,999999              |
| $P_{\text{сист}}$              | 0,9952                               | 0,9966                | 0,9999999                            | 0,9999999             |

средственное управление работой приводов. Для расчета аппаратной надежности МК доступны официальные отчеты фирмы-производителя, например, значение<sup>1</sup> среднего времени работы до наступления отказа  $MTTF = 186\,655\,346$  ч. Альтернативный двухуровневый вариант структуры системы управления приведен в п. 1) реализации методики и показан на рис. 2.

4) *Интерпретация результатов оценки безотказной работы компонентов программно-аппаратной встроенной МСУ.* Итоговые оценки вероятности безотказной работы модулей в заданных условиях для варианта с двумя уровнями и параллельным соединением блоков в сравнении с одноуровневой последовательной системой приведены в табл. 3.

При этом использованы следующие обозначения вероятностей безотказной работы при заданных условиях:  $P_{RPI}$  – для аппаратного обеспечения RaspberryPi 4B,  $P_{OC}$  – для программного обеспечения (встраиваемой операционной системы Linux),  $P_{\text{мод}}$  – для программных модулей,  $P_{MK}$  – для аппаратной части микроконтроллера,  $P_{MK \text{ мод}}$  – для программной части модулей ПО микроконтроллера,  $P_{\text{сист}}$  – итоговая вероятность безотказной работы всей системы при заданных условиях.

### 3. Обсуждение результатов

Как видно из табл. 2, в любом варианте оценки вероятность безотказной работы для достаточно малого интервала времени – 12 часов, является недостаточной. Важно отметить, что вероятность безотказной работы аппаратной части в течение заданного промежутка времени оценивается существенно выше, чем аналогичные показатели для программной части.

Как видно из табл. 3, за счет внедрения дополнительного уровня с частичным распараллеливанием функций и частичным резервированием каналов управления и индикации была значительно повышена оценка вероятности безотказной работы в заданных условиях системы, выполненной на актуальных на сегодняшний день программно-аппаратных устройствах.

<sup>1</sup> Reliability report microchip.com [Электронный ресурс] URL: <https://www.microchip.com/reliabilityreport/#/>

### 4. Выводы

Несмотря на тенденцию к интеграции максимального числа функций в единую систему на кристалле или в рамках одноплатного компьютера, для повышения вероятности безотказной работы встраиваемых программно-аппаратных микропроцессорных систем целесообразным является их двухуровневое построение, при котором ключевые задачи в части непосредственной работы с аппаратным окружением перераспределяются в пользу отдельного аппаратного модуля. Такой модуль должен строиться на микроконтроллере, а его программное обеспечение – иметь самый низкий из возможных уровней виртуализации или не иметь его вовсе. Кроме того, данный модуль может также выполнять функции аппаратного гипервизора, контролируя работоспособность верхнего аппаратного уровня и, при необходимости, выполнять его перезагрузку, не прерывая выполнения собственных задач.

С использованием указанного подхода была построена система управления медицинским роботом, и проведенное всестороннее тестирование не выявило отказов или сбоев в работе.

В то же время при анализе методов оценки надежности программно-аппаратных встраиваемых систем было установлено, что практические методы испытаний на отказ подразумевают множественное повторение условий экспериментов и воздействий, и на этом основании строится вероятностная оценка. К тому же, как показано в работе, надежность базового аппаратного обеспечения достаточно высока и значение вероятности программного отказа может быть существенно выше, чем аппаратного. Для встраиваемых систем нижнего уровня, в котором программная компонента непосредственно связана с аппаратной частью, периферией и цифровыми интерфейсами, методы практической оценки вероятности отказа было бы целесообразно дорабатывать с учетом особенностей рассматриваемых систем.

### Библиографический список

1. Deepa V.V., Thamotharan B., Mahto D. et al. Smart embedded health monitoring system and secure electronic health record (EHR) transactions using blockchain



technology // *SoftComput.* 2023. Vol. 27. Pp. 12741–12756. DOI: 10.1007/s00500-023-08893-4

2. Siraj I., Bharti P.S. Reliability analysis of a 3D Printing process // *Procedia Computer Science.* 2020. Vol. 173. Pp. 191-200. DOI: 10.1016/j.procs.2020.06.023

3. Shubinsky I.B., Schäbe H. On the definition of functional reliability // *RT&A.* 2012. № 4(27). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/on-the-definition-of-functional-reliability> (дата обращения: 12.08.2024).

4. Burgazzi L. Reliability Evaluation of Passive Systems Through Functional Reliability Assessment // *NuclearTechnology.* 2003. Vol. 144. DOI: 10.13182/NT144-145.

5. Шубинский И.Б. Структурная надежность информационных систем. Методы анализа. М.: «Журнал Надежность», 2012. 216 с.

6. Ершов Г.А., Семериков В.Н., Семериков Н.В. Чему верить? О системе стандартов «Надежность в технике» // *Стандарты и качество.* 2018. № 8. С. 14-19.

7. Нетес В.А. Как вернуть доверие? О системе стандартов «Надежность в технике» // *Стандарты и качество.* 2019. № 2. С. 19-24.

8. Потапов И.В., Баева М.А. Вопросы терминологии надежности в области программ и программных средств // *Надежность.* 2015. № 4. С. 65-74. DOI: 10.21683/1729-2646-2015-0-4-65-74

9. Шубинский И.Б. Методы обеспечения функциональной надежности программ // *Надежность.* 2014. № 4. С. 87-101. DOI: 10.21683/1729-2646-2014-0-4-87-101

10. Нетес В.А. Объект в надежности: определение и содержание понятия // *Надежность.* 2019. № 19(4). С. 3-7. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-4-3-7

11. Климов С.М., Сосновский Ю.В. Методика оценки защищенности микропроцессорных систем управления в условиях информационно-технических воздействий // *Надежность.* 2018. № 18(4). С. 36-44. DOI: 10.21683/1729-2646-2018-18-4-36-44

12. Капур К., Ламберсон Л. Надежность и проектирование систем / под ред. И.А. Ушакова. Пер. с англ. М.: «Мир», 1980. 604 с., ил.

13. Системное обоснование концептуальных положений применения передовых космических технологий / под ред. В.М. Буренка и А.Е. Тюлина. М.: Инновационное машиностроение, 2023. 372 с., ил.

14. Littlewood B., Strigini L. Validation of Ultra-High Dependability for Software-based Systems // *Commun. ACM.* 1993. Vol. 36. Pp. 69-80. DOI: 10.1145/163359.163373

15. Предложение по определению эксплуатационной надежности программного обеспечения сложных технических систем / А.С. Белов, М.М. Добрышин, А.Н. Горшков, Д.Е. Шугуров // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки.* 2022. № 9. С. 143-148. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-9-143-148

16. Ивутин А.Н., Суслин А.А. О некоторых применениях статистических распределений в оценке надеж-

ности программного обеспечения // *Известия ТулГУ. Технические науки.* 2011. № 2. С. 568-575.

## References

1. Deepa V.V., Thamotharan B., Mahto D. et al. Smart embedded health monitoring system and secure electronic health record (EHR) transactions using blockchain technology. *SoftComput* 2023;27:12741–12756. DOI: 10.1007/s00500-023-08893-4.

2. Siraj I., Bharti P.S. Reliability analysis of a 3D Printing process. *Procedia Computer Science* 2020;173:191-200. DOI: 10.1016/j.procs.2020.06.023.

3. Shubinsky I.B., Schäbe H. On the definition of functional reliability. *RT&A* 2012;4(27). (accessed 12.08.2024). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/on-the-definition-of-functional-reliability>.

4. Burgazzi L. Reliability Evaluation of Passive Systems Through Functional Reliability Assessment. *Nuclear Technology* 2003;144. DOI: 10.13182/NT144-145.

5. Shubinsky I.B. [Structural dependability of information systems. Analysis methods]. Moscow: Dependability Journal; 2012. (in Russ.)

6. Yershov G.A., Semerikov V.N., Semerikov N.V. [What to believe? On the system of standards “Dependability in engineering”]. *Standarty i kachestvo* 2018;8:14-19. (in Russ.)

7. Netes V.A. [How to regain trust? About the system of standards “Dependability in engineering”]. *Standarty i kachestvo* 2019;2:19-24. (in Russ.)

8. Potapov I.V., Baeva M.A. Terminology issues related to reliability of programs and software. *Dependability* 2015;(4):65-74. DOI: 10.21683/1729-2646-2015-0-4-65-74.

9. Shubinsky I.B. Methods of software functional dependability assurance. *Dependability* 2014;(4):87-101. DOI: 10.21683/1729-2646-2014-0-4-87-101.

10. Netes V.A. Item in dependability: definition and content of the concept. *Dependability* 2019;19(4):3-7. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-4-3-7.

11. Klimov S.M., Sosnovsky Yu.V. Method of assessing the protection of computer-based control systems under information technology interference. *Dependability* 2018; 18(4):36-44. DOI: 10.21683/ 1729- 1729-2646-2018-18-4- 44.

12. Kapur K., Lamberson L. Ushakov I.A., editor. Reliability in Engineering Design. Moscow: Mir; 1980.

13. Burenok V.M., Tyulin A.E., editors. [Systematic substantiation of the conceptual provisions of the application of advanced space technologies]. Moscow: Innovatsionnoye mashinostroyeniye; 2023. (in Russ.)

14. Littlewood B., Strigini L. Validation of Ultra-High Dependability for Software-based Systems. *Commun. ACM* 1993;36:69-80. DOI: 10.1145/163359.163373.

15. Belov A.S., Dobrynin M.M., Gorshkov A.A., Shugurov D.E. Proposal for determining the operational reliability of software complex technical systems. *News of*

*the Tula state university. Technical sciences* 2022;9:143-148. DOI: 10.24412/2071-6168-2022-9-143-148. (in Russ.)

16. Ivutin A.N., Suslin A.A. Some remarkable appliances of statistical distributions in software reliability estimation. *News of the Tula state university. Technical sciences* 2011;2:568-575. (in Russ.)

## Сведения об авторах

**Сергей М. Климов** – доктор технических наук, профессор МГТУ им. М.Э. Баумана, профессор, e-mail: klimov.serg2012@yandex.ru.

**Юрий В. Сосновский** – кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерной инженерии и моделирования Физико-технического института Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского, e-mail: yuri.sosnovskij@yandex.ru

**Денис Р. Чачиев** – магистр, специалист кафедры компьютерной инженерии и моделирования Физико-технического института Крымского федерального университета им. В.И. Вернадского, e-mail: denis.chachiev@mail.ru.

## About the authors

**Sergey M. Klimov**, Doctor of Engineering, Professor, Bauman Moscow State Technical University, Professor, e-mail: klimov.serg2012@yandex.ru.

**Yuri V. Sosnovsky**, Candidate of Engineering, Senior Lecturer, Department of Computer Engineering and Modeling, Physics and Technology Institute, Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky, e-mail: yuri.sosnovskij@yandex.ru.

**Denis R. Chachiev**, Master Student, Specialist, Department of Computer Engineering and Modeling, Physics and

Technology Institute, Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky, e-mail: denis.chachiev@mail.ru.

## Вклад авторов в статью

Автором **Климовым С.М.** выполнена постановка задачи разработки встраиваемой программно-аппаратной системы управления медицинского робота и необходимость оценки компонент программной и аппаратной надежности системы. Разработаны методы вычисления вероятности сбоев при передаче данных между элементами функционирования информационной системы.

Автором **Сосновским Ю.В.** выполнен анализ литературы по теме исследования, определены понятия «функциональная надежность» и «информационная надежность» для встраиваемых программно-аппаратных микропроцессорных систем, часто относимых и к распределенным системам. Функциональная надежность характеризует степень соответствия основных показателей надежности системы тем, которые заложены в техническом задании или технических требованиях к функциональным возможностям гетерогенной информационной встраиваемой системы.

Автором **Чачиевым Д.Р.** был выполнен анализ регламентирующих документов и источников в Интернет, рассчитаны значения вероятности безотказной работы компонент системы в течение выбранного промежутка времени – 12 часов, разработана структурная схема встраиваемой микропроцессорной системы управления двух альтернативных вариантов.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

# Использование качественных характеристик изображения для комплексного стегоанализа

## Using the qualitative characteristics of an image for comprehensive steganalysis

Грачев Я.Л.<sup>1\*</sup>, Сидоренко В.Г.<sup>1</sup>  
Grachev Ya.L., Sidorenko V.G.

<sup>1</sup>Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация

<sup>1</sup>Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation

\*yaroslav446@mail.ru



Грачев Я.Л.



Сидоренко В.Г.

**Резюме. Цель.** Задача стегоанализа изображений стоит особенно актуально ввиду использования стеганографического скрытия в графических файлах для доставки вредоносного кода и информации при совершении кибератак. В этой связи требуется совершенствование существующих способов детектирования встроенной средствами стеганографии информации. Одним из подходов является использование методики комплексного стегоанализа, предполагающей формирование вывода о детектировании встраивания на основе результатов применения группы из нескольких методов стегоанализа, а также вспомогательных расчетов. **Методы.** Для повышения точности детектирования скрытой информации предлагается использовать качественные оценки изображений. В статье продемонстрирована связь между значениями таких оценок и увеличением ошибок работы методов стегоанализа. Методика комплексного стегоанализа, включающая в себя учет качественных характеристик изображений, позволяет повысить точность формируемой оценки путем уменьшения ложноположительных результатов. В статье используются статистические методы подсчета качественных характеристик изображения, оценки корреляции Спирмена, методы машинного обучения. **Результаты.** Разработан программный комплекс, интегрирующий описанные в статье элементы методики комплексного стегоанализа, включающие в себя как группу методов стегоанализа, так и набор оцениваемых качественных характеристик изображения. Дана оценка связи качественных характеристик изображения с ошибками в результатах работы методов стегоанализа на пустых контейнерах. Сформированы тестовые выборки и построены модели машинного обучения, формирующие вывод об обнаружении скрытой информации в изображении. **Заключение.** Предложенный подход позволяет увеличить точности детектирования скрытой информации при учете оценок качественных характеристик изображения в рамках стегоанализа, что подтверждается экспериментально.

**Abstract. Aim.** The problem of image steganalysis is especially relevant given the use of steganographical concealment in graphic files for delivering malicious code and information as part of cyber attacks. That requires improvements to the existing methods of detecting steganographically embedded information. One method is to use a comprehensive steganalysis technique that involves concluding on the detection of embedded information based on the findings of a group of steganalysis methods, as well as auxiliary calculations.

**Methods.** It is proposed improving the accuracy of hidden information detection by using qualitative image estimation. The paper demonstrates the relationship between the estimates and the increased rate of steganalysis errors. The method of comprehensive steganalysis that involves accounting for the qualitative characteristics of images allows improving the accuracy of estimation by reducing the rate of false positives. The paper uses statistical methods for calculating the qualitative characteristics of images, Spearman correlation, and machine learning. **Results.** A software package has been developed that integrates elements of the comprehensive steganalysis method described in the paper that includes both a group of steganalysis methods, and a set of evaluated qualitative characteristics of an image. The author evaluates the relationship between the qualitative characteristics of an image and the steganalysis errors in the case of empty containers. Test samples have been defined and machine learning models have been built that generate a conclusion as regards the detection of hidden information in an image. **Conclusion.** The proposed method enables improved accuracy of hidden information detection, while taking into account the estimates of the qualitative characteristics of an image as part of steganalysis, which is confirmed experimentally.



**Ключевые слова:** стегоанализ, стеганография, изображение, метод Хи-квадрат, метод *Regular-Singular*, качественные характеристики.  
**Keywords:** *steganalysis, steganography, image, Chi-square method, Regular-Singular method, qualitative characteristics.*

**Для цитирования:** Грачев Я.Л.<sup>1\*</sup>, Сидоренко В.Г. Использование качественных характеристик изображения для комплексного стегоанализа // Надежность. 2025. №1. С. 67-74. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-1-67-74>

**For citation:** Grachev Ya.L., Sidorenko V.G. Using the qualitative characteristics of an image for comprehensive steganalysis. *Dependability* 2025;1:67-74. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2025-25-1-67-74>

**Поступила:** 13.09.2024 / **После доработки:** 19.11.2024 / **К печати:** 05.03.2025

**Received on:** 13.09.2024 / **Revised on:** 19.11.2024 / **For printing:** 05.03.2025

## Введение

Стеганография является одним из актуальных способов доставки необходимой злоумышленнику для совершения атаки информации внутрь атакуемой системы [1]. Как правило, это происходит после внедрения в атакуемую систему специального загрузчика, способного принять файл, содержащий скрытые данные, и извлечь вредоносную информацию (например, исполняемый вредоносный код) [1]. Часто такими файлами являются изображения – то есть файлы графических форматов. Это связано с большим доступным объемом контейнера, в котором методы стеганографии позволяют скрыть данные.

Задача обнаружения подобного рода скрытой информации в файлах изображений является важной составляющей мер по предотвращению осуществления кибератак, позволяя вовремя пресечь проникновение внутрь системы подозрительных данных, имеющих шансы быть вредоносными. Эту задачу решают методы стегоанализа.

## 1. Методика комплексного стегоанализа

Одной из ключевых проблем стегоанализа является невозможность в общем случае заранее знать метод или технику стеганографического скрытия, примененного для встраивания информации в контейнер. Большинство методов стегоанализа направлены на выявление только определенных видов стеганографии – например, скрытия в наименьших значащих битах (НЗБ) или скрытия, произведенного по методу Коха-Жао [2].

Задачу осуществления стегоанализа при неимении какой-либо дополнительной информации, кроме непосредственно подозрительного файла изображения, призваны решать методы т.н. «слепого стегоанализа» (также – «слепые методы») [3, 4]. Можно выделить два общих подхода к развитию таких методов:

1. Анализ статистических характеристик изображения с целью обнаружить нарушения и искажения, практически неизменно сопровождающие применение любых стеганографических методов;

2. Анализ на основе применения сразу нескольких методов стегоанализа и оценки различных характеристик изображения – данный подход предлагается называть «комплексным стегоанализом».

Первый подход, фактически, преследует цель создания некоего универсального метода стегоанализа – детектора, способного обнаруживать искажения, неизбежно вносимые сокрытием информации при помощи стеганографии. На данный момент такого универсального метода не существует, и исследование возможности его построения является отдельной подзадачей теории стегоанализа.

Второй же подход является более реалистичным и применимым на практике. В частности, его примером является предложенный Джессикой Фридрих анализатор “*cover-versus-all-stego classifier*” [3].

Комплексный стегоанализ подразумевает выполнение трех основных операций:

1. Применение методов стегоанализа;
2. Осуществление дополнительных вычислений и оценок (подсчет статистических характеристик, вычисление общего количества пикселей и т.п.);
3. Принятие решения об обнаружении стеганографического скрытия на основе результатов, полученных в п. 1 и п. 2.

При этом второй шаг дополнительных вычислений может быть опущен в конкретных реализациях данного подхода – в таких случаях решение об обнаружении стеганографии применяется исключительно на основе набора результатов применения методов стегоанализа. Примером такого подхода является метод совместного применения стеганоаналитических методов, предложенный в [5]: в нем на основе результатов работы методов оценки по критерию Хи-квадрат и *Regular-Singular* предложен способ формирования вывода о наличии либо отсутствии стеганографического скрытия в файле изображения и даже, при выполнении некоторых условий, оценке объема скрытой информации [6, 7]. Однако данный метод позволяет обнаружить только встраивание, произведенное в НЗБ.

Для реализации комплексного стегоанализа в более полном виде требуется расширить набор применяемых

методов стегоанализа за счет алгоритмов, направленных на обнаружение информации, скрытой наиболее различными и наиболее популярными методами стеганографии. В частности, необходимо включить в набор методы анализа не только в пространственной области изображения (например, стегоанализ скрытия в НЗБ), но и частотной (например, реверсивные методы анализа скрытия, произведенного по Коха-Жао [8]).

Помимо формирования набора используемых методов стегоанализа важной задачей является реализация третьего пункта – то есть выбор алгоритма для принятия решения об обнаружении скрытой информации. Если при совместном применении лишь двух методов стегоанализа возможно формирование системы простых условий, как показано в [1], то при наличии более обширного контекста, полученного на первых двух шагах комплексного стегоанализа, требуется иной подход. Наиболее очевидным решением является применение методов машинного обучения, как было показано в [3].

Существуют два основных подхода к использованию машинного обучения для модуля принятия решения об обнаружении стеганографии [3]:

1. Обучение бинарного классификатора, различающего пустые и заполненные графические контейнеры;
2. Обучение распознаванию пустых графических контейнеров (чтобы любой результат, не распознанный как изображение с пустым контейнером, сигнализировал об обнаружении скрытия).

Анализатор «*cover-versus-all-stego classifier*» использует первый подход, и ключевым выводом, основанным на тестировании его эффективности, является способность обнаруживать информацию, встроенную методами стеганографии, методы атак на которые не были включены в набор стегоаналитических методов комплексного стегоанализа и на которых не проводилось обучение [3].

Таким образом, важной задачей методики комплексного стегоанализа является выбор алгоритмов стегоанализа, а также иных, результаты работы которых способны оказывать позитивный эффект на обучение и работу модуля принятия решений об обнаружении стеганографии, основанного на методах машинного обучения.

## 2. Использование качественных характеристик изображения для комплексного стегоанализа

Помимо оценок непосредственно методов стегоанализа возможно также использование иных числовых характеристик, вычисленных на основе анализируемого изображения, для передачи их в качестве входных данных в модуль принятия решений в целях корректировки получаемых результатов. Таким образом, комплексный стегоанализ может включать в себя не только стегоаналитические методы, но и вспомогательные алгоритмы, используемые для повышения точности оценки.

Одними из таких характеристик могут быть оценки качества изображений. Так как изображения, имеющие низкое качество, могут иметь нетипичные или аномальные статистические характеристики, может снижаться точность ряда математических методов стегоанализа, алгоритмы которых основаны на аппарате математической статистики.

Это легко проследить путем визуального осмотра: изображения низкого качества зачастую имеют завышенные показатели предполагаемого объема скрытой информации, вычисленного методами Хи-квадрат и *Regular-Singular* при пустом контейнере – примеры приведены в табл. 1.

Согласно [1], критическими значениями оценки (превышение которых сигнализирует об обнаружении стеганографического встраивания в изображения) методом Хи-квадрат является 0,105%, а методом *Regular-Singular* – 4,055%. Для каждого из приведенных выше изображений оценка хотя бы одним из методов превышает критическую несмотря на то, что в данных изображениях не осуществлялось скрытие информации.

К качественным характеристикам изображения относятся, как правило, следующие [9]:

1. Резкость;
2. Размытость;
3. Зашумленность;
4. Контрастность;
5. Энтропия.

Для использования в рамках комплексного стегоанализа требуются алгоритмы вычисления данных характери-

Табл. 1. Примеры завышенных стегоаналитических оценок низкокачественных изображений

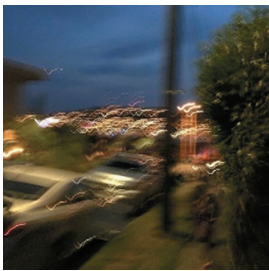
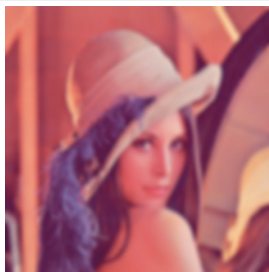
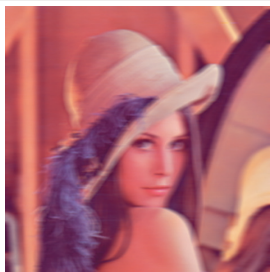
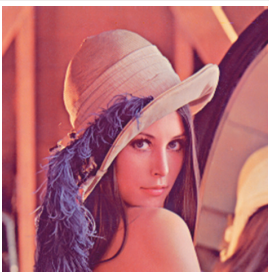
| Изображение                            |  |  |  |  |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Оценка методом Хи-квадрат              | 1,67%                                                                               | 0%                                                                                  | 0%                                                                                   | 0,33%                                                                                 |
| Оценка методом <i>Regular-Singular</i> | 1,97%                                                                               | 6,92%                                                                               | 6,5%                                                                                 | 1,84%                                                                                 |

Табл. 2. Примеры оценок уровня размытости тестового изображения «fruits»

|                        |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Изображение            |  |  |  |  |
| Оценка уровня резкости | 2,964                                                                             | 1,320                                                                             | 0,565                                                                              | 0,309                                                                               |

Табл. 3. Примеры оценок уровня размытости тестового изображения «lena»

|                        |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Изображение            |  |  |  |  |
| Оценка уровня резкости | 2,325                                                                             | 1,579                                                                             | 0,526                                                                              | 0,277                                                                               |

стик, не требующие эталона или сравнения двух различных изображений между собой, и способные в качестве результата представить некую числовую характеристику – оценку, соответствующую степени, соответственно, резкости, размытости и т.д. Согласно классификации качественных оценок изображений, представленной Монич и Старовойтовым, вышеописанным условиям соответствует группа абсолютных количественных оценок [9].

Поскольку изображения низкого качества могут получать завышенные оценки скрытого объема информации, анализ результатов подсчета качественных характеристик может использоваться, в первую очередь, для снижения количества ложноположительных результатов: значительная оценка скрытого объема информации при характеристиках, указывающих на заметные искажения в качестве изображения, для метода *Regular-Singular* скорее всего должна игнорироваться. Поскольку оценка объема скрытого сообщения для пустого контейнера фактически является величиной ошибки – отклонения в оценке размера встроенной информации (от нуля) – наличие корреляции между данной величиной и вышеуказанными качественными характеристиками изображения означает возможность использования оценки данной характеристики для уточнения результатов комплексного стегоанализа.

Способ оценки уровней зашумленности и резкости изображения в рамках подсчета качественных характеристик описан в [10]. Для подсчета уровня шума предлагается использовать метод, предложенный Новиковым и Пронькиным [11], основанный на сравнении нескольких групп пикселей с наименьшей дисперсией с их сглаженными версиями.

Для оценки уровня резкости используется безэталонный метод, основанный на поиске расстояния между пикселями с минимальной и максимальной интенсивностью в окрестностях каждого краевого пикселя, полученного в результате применения детектора Канни [12]. Мерой резкости в данном методе предлагается считать максимальное из полученных значений резкости по каждому из краевых пикселей.

Метод оценки размытости, предложенный Монич и Старовойтовым, подразумевает сведение задачи о безэталонной оценке к задаче получения сравнительной оценки [13]. С помощью свертки исходного изображения с усредняющим фильтром формируется его размытая версия, которая впоследствии сравнивается с оригинальной. Примеры оценок размытости для тестовых изображений приведены в табл. 2 и табл. 3.

Метод подсчета контраста основан на вычислении локальных оценок контраста по формуле Гордона, которая использует для этого средние значения яркости в квадратных окрестностях пикселей с линейными размерами 3 и 9 [14]. Для получения единой оценки контраста используются параметры распределения Вейбулла [14]. Примеры оценок контраста приведены в табл. 4 и табл. 5.

В качестве оценок энтропии используются формулы энтропии по Шеннону и Реньи [15]. Для подсчета энтропии изображения используется единый подход, при котором вначале формируется гистограмма изображения – то есть распределение градаций яркости пикселей (отношение числа появлений пикселей  $k$ -ого уровня яркости к общему числу пикселей). На основе этой гистограммы осуществляется вычисление энтро-



Табл. 4. Примеры оценок уровня контраста тестового изображения «fruits»

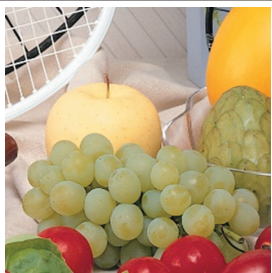
|                    |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Изображение        |  |  |  |  |
| Оценка уровня шума | 0,713                                                                             | 0,733                                                                             | 0,770                                                                              | 0,843                                                                               |

Табл. 5. Примеры оценок уровня контраста тестового изображения «lena»

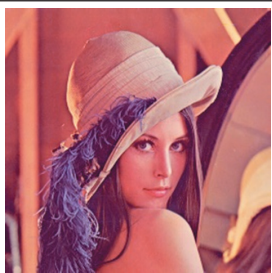
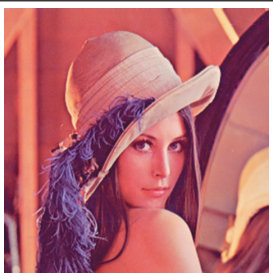
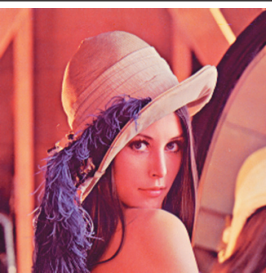
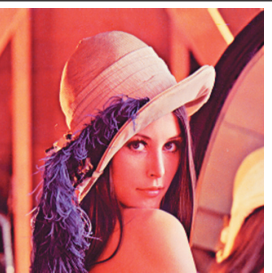
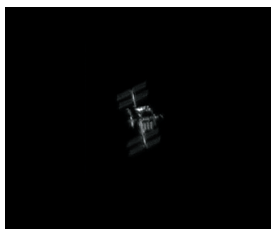
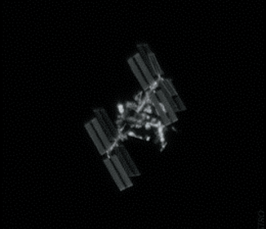
|                    |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Изображение        |  |  |  |  |
| Оценка уровня шума | 0,621                                                                             | 0,633                                                                             | 0,651                                                                              | 0,688                                                                               |

Табл. 6. Примеры оценок уровня энтропии набора тестовых изображений

|                  |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Изображение      |  |  |  |  |
| Энтропия Шеннона | 0,452                                                                               | 2,608                                                                               | 2,800                                                                                | 4,164                                                                                 |
| Энтропия Реньи   | 0,091                                                                               | 1,487                                                                               | 1,782                                                                                | 2,507                                                                                 |

пий. В табл. 6 представлены примеры оценок энтропии Шеннона и Реньи для изображений.

### 3. Связь между качественными оценками изображения и результатами стегоанализа

Для подсчета корреляции между качественными оценками изображения и результатами его стегоанализа при незаполненном контейнере была сформирована выборка из 16614-ти изображений, в которую вошли графические файлы из различных открытых датасетов, включающих в себя:

- изображения с размытием в движении;
- шумные изображения;
- нечеткие изображения.

Для каждого изображения были осуществлены процедуры стегоанализа методами Хи-квадрат и *Regular-Singular*, а также выполнены подсчеты качественных характеристик. Далее были вычислены коэффициенты корреляции Спирмена между характеристиками и результатом оценки каждым из стегоаналитических методов. Полученные значения коэффициенты представлены в табл. 7.

Статистическую значимость полученных значений корреляции можно определить с помощью *t*-критерия Стьюдента [16]:

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}},$$

где  $r$  – коэффициент корреляции,  $n$  – размер выборки.

Табл. 7. Коэффициенты корреляции между оценками методами стегоанализа и оценками качества изображения

|                         | Шум    | Резкость | Размытость | Контраст | Шеннон | Реньи  |
|-------------------------|--------|----------|------------|----------|--------|--------|
| <i>Regular-Singular</i> | 0,5606 | 0,5838   | -0,7327    | 0,0672   | 0,3821 | 0,2715 |
| Хи-квадрат              | 0,3873 | 0,2546   | -0,4472    | -0,1162  | 0,2939 | 0,3576 |

Табл. 8. Значения *t*-критерия Стьюдента

|                         | Шум    | Резкость | Размытость | Контраст | Шеннон | Реньи  |
|-------------------------|--------|----------|------------|----------|--------|--------|
| <i>Regular-Singular</i> | 87,249 | 92,673   | -138,759   | 8,690    | 53,296 | 36,359 |
| Хи-квадрат              | 54,132 | 33,934   | -64,454    | -15,072  | 39,637 | 49,349 |

Вычисленные величины *t*-критерия Стьюдента для каждого из полученных коэффициентов корреляции приведены в табл. 8.

Критическое значение критерия Стьюдента при заданном уровне значимости  $\alpha = 0,01$  равняется 2,5761. Поскольку все вычисленные значения *t*-критерия превышают критическое, все исследуемые корреляционные связи являются статистически значимыми.

Поскольку критерий Стьюдента позволяет понять, является ли корреляция значимой, но не то, насколько она значима (насколько сильна корреляционная связь), значения коэффициентов корреляции были проанализированы по шкале Чеддока [17]. Согласно ей, существует высокая корреляция между размытостью и оценками методом *Regular-Singular* (причем повышение размытости ведет к уменьшению оценки по RS). Также сильными (заметными) являются корреляции оценок по RS с шумом и резкостью. Остальные корреляции являются умеренными или слабыми (оставаясь, при этом, статистически значимыми).

#### 4. Учет качественных характеристик при принятии решений об обнаружении стеганографии

Поскольку статистически значимая корреляционная связь между качественными оценками изображения и результатами стегоанализа методами Хи-квадрат и *Regular-Singular* подтверждена, эти данные могут быть использованы для обучения модуля принятия решения об обнаружении стеганографического скрытия, выполняющего финальную операцию комплексного стегоанализа.

Поскольку оба вышеуказанных метода стегоанализа осуществляют атаки на стеганографию только в пространственной области, следует включить в набор используемых методов алгоритм, способный детектировать скрытую информацию в частотной области. В данном случае не рассматривается связь между методами стегоанализа в частотной области и качественными оценками изображения, такой метод предлагается рассматривать также как вспомогательный для уменьшения количества ложноположительных результатов, связанных с чувствительностью метода *Regular-Singular* ко встраиванию в частотную область изображения в ряде случаев. В табл. 9 продемонстрировано, каким образом меняется оценка методом *Regular-Singular* в зависимо-

сти от объема информации, реально скрытой методом Коха-Жао в тестовом изображении.

Табл. 9. Примеры изменения оценок методом *Regular-Singular* при скрытии данных методом Коха-Жао для изображения «fruits»

| Объем информации, скрытой методом Коха-Жао, бит                                     | 0    | 426  | 822  | 2484 |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|
| Оценка относительного объема скрытой информации методом <i>Regular-Singular</i> , % | 3,46 | 4,03 | 5,16 | 9,66 |

Таким образом, рассматривается метод комплексного стегоанализа, в первую очередь рассчитанный на обнаружение стеганографического скрытия в пространственной области изображения. Он включает в себя алгоритмы стегоанализа по методам Хи-квадрат, *Regular-Singular* и реверсивного метода стегоанализа скрытия, произведенного по методу Коха-Жао, а также набор алгоритмов расчета оценок качественных характеристик изображения – зашумленности, резкости, размытости, контраста и энтропии.

Для экспериментальной проверки данного метода была подготовлена выборка из 16592 изображений. В половине изображений выборки было осуществлено встраивание информации последовательной или псевдослучайной вариацией методов НЗБ или Коха-Жао случайным образом. Объем и содержимое скрытой информации также выбирались случайным образом.

Для каждого изображения были выполнены расчеты:

- оценки относительного объема скрытой информации методом Хи-квадрат;
- оценки относительного объема скрытой информации методом *Regular-Singular*;
- оценки предполагаемого порога встраивания и битового объема скрытой информации методом анализа скрытия, произведенного по Коха-Жао;
- оценок качественных характеристик.

Для выбора наиболее эффективного метода машинного обучения и проведения обучения используется фреймворк *ML.NET*. Наибольшую точность на обучающем наборе данных показал алгоритм случайного леса (в терминологии, используемой фреймворком *ML.NET* – «FastForest») – 0,84. Точности других методов составили:

- «FastTree» (реализация алгоритма градиентного бустинга *MART*): 0,82.

- «*LightGBM*» (алгоритм стохастического градиентного бустинга): 0,81.

- «*LFBGS*» (реализация оптимизированного с точки зрения потребления памяти варианта алгоритма Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно): 0,77.

- «*SDCA*» (алгоритм «*Stochastic Dual Coordinate Ascent*» стохастического градиентного бустинга): 0,74.

Алгоритм случайного леса основан на применении большого ансамбля решающих деревьев, за счет количества которых достигается достаточная точность классификации. Классификация осуществляется путем жесткого голосования – то есть выбирается тот класс, который получен большинством решающих деревьев.

Полученная вышеописанным алгоритмом точность составила 0,84. При аналогичном наборе входных данных, из которых были исключены оценки качественных характеристик изображения (оставлены только данные о результатах стегоанализа методами *Regular-Singular*, Хи-квадрат и анализа скрытия по Коха-Жао) наибольшую точность также показал алгоритм случайного леса, однако его точность составила 0,79. Таким образом, обучение на данных, содержащих оценки качественных характеристик изображений помимо исключительно результатов стегоанализа, оказалось более эффективным.

Для дополнительной проверки обученной модели была использована отдельная непересекающаяся с обучающей выборка из 994 изображений, в половине из которых было осуществлено встраивание информации. Результаты проверки собраны в матрице ошибок в табл. 10.

**Табл. 10. Матрица ошибок обученной модели**

| Действительные данные | Оценка моделью     |                       |
|-----------------------|--------------------|-----------------------|
|                       | Определено скрытие | Не определено скрытие |
| Со скрытием           | 492                | 5                     |
| Без скрытия           | 12                 | 485                   |

Как видно, ложноотрицательный результат был получен в примерно 1% случаев, а ложноположительный – в 2,4%. Суммарная точность модели на проверочной выборке составила 98,3%.

## Заключение

Методика комплексного стегоанализа представляет собой актуальный подход к выявлению информации, скрытой при помощи стеганографии, в графических файлах. Помимо использования непосредственно различных стегоаналитических алгоритмов, направленных на обнаружении определенных видов стеганографии, для уточнения результата возможно использовать дополнительные данные о присущих изображению характеристиках – в частности, оценки качества изображения, выражающиеся в подсчете резкости, размытости, зашумленности, контраста и энтропии изображения.

Включение оценок качественных характеристик изображения в наборы данных для обучения систем, принимающих решение об обнаружении стеганографи-

ческого встраивания в изображении, в рамках методики комплексного стегоанализа позволяет повысить точность детектирования факта такого встраивания. Это достигается за счет отсека ложноположительных результатов, связанных с завышением оценок, получаемых при работе методов стегоанализа для изображений низкого качества, в которые не производилось встраивание (пустых контейнеров).

Построение обученной модели машинного обучения, способной формировать вывод о наличии или отсутствии стеганографического встраивания в изображении, с использованием не только оценок, получаемых при работе стегоаналитических алгоритмов, но и вычисленных оценок качественных характеристик, позволяет повысить точность работы подобного стегодетектора в сравнении с аналогом, не учитывающим показатели качества изображения.

## Библиографический список

1. Грачев Я.Л., Сидоренко В.Г. Задачи автоматизации стегоанализа // Материалы II Международной научно-практической конференции «Интеллектуальные транспортные системы» (25 мая 2023 г.). М.: РУТ МИИТ, 2023. С. 450–455.
2. Конахович Г.Ф., Пузыренко А.Ю. Компьютерная стеганография. Теория и практика. Киев: «МК-Пресс», 2006. 286 с.
3. Jessica Fridrich. Steganography in Digital Media. Principles, Algorithms, and Applications. Cambridge: «Cambridge University Press», 2010. 431 с.
4. Грачев Я.Л., Сидоренко В.Г. Применение стегоанализа для обеспечения целостности информации в интеллектуальных системах транспорта // Материалы Международной научно-практической конференции «Интеллектуальные транспортные системы» (26 мая 2022 г.). М.: РУТ МИИТ, 2023. С. 389–396.
5. Грачев Я.Л., Сидоренко В.Г. Стегоанализ методов скрытия информации в графических контейнерах // Надежность. 2021. Т. 21. № 3. С. 39–46.
6. Westfeld A., Pfitzmann A. Attacks on Steganographic Systems. Dresden University of Technology, Department of Computer Science, Dresden, Germany, 1999. DOI: 10.1007/10719724\_5
7. Fridrich J., Goljan M., Du R. Reliable Detection of LSB Steganography in Color and Grayscale Images. Binghamton University, New York, USA, 2001. DOI: 10.1145/1232454.1232466
8. Белим С.В., Вильховский Д.Э. Стегоанализ алгоритма Коха-Жао // Математические структуры и моделирование. 2018. № 4(48). С. 113–119. DOI: 10.25513/2222-8772.2018.4.113-119
9. Монич Ю.И., Старовойтов В.В. Оценки качества для анализа цифровых изображений // Искусственный интеллект. 2008. № 4. С. 376–386.
10. Грачев Я.Л., Сидоренко В.Г. Использование статистических характеристик изображения для уточнения результатов стегоанализа // Материалы III Международной научно-практической конференции «Интеллектуальные транспортные системы» (30 мая 2024 г.). С. 563–569.



11. Новиков А.И., Пронькин А.В. Метод оценки уровня шума цифрового изображения // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45. № 5. С. 713-720.

12. Wang X., Tian B., Liang C. et al. Blind Image Quality Assessment for Measuring Image Blur // Proceedings of 2008 Congress on Image and Signal Processing (27-30 May 2008). 2008. Vol. 1. Pp. 467-470.

13. Монич Ю.И., Старовойтов В.В. Мера оценки резкости цифрового изображения // Доклады БГУИР. 2011. № 1(55). С. 80-84.

14. Голуб Ю.И., Старовойтов Ф.В. Исследование локальных оценок контраста цифровых изображений при отсутствии эталона // Системный анализ. 2019. № 2. С. 4-11.

15. Тимошенко А.В., Кошкарров А.С. Сравнительный анализ энтропийных метрик информативности оптических изображений космических объектов // Труды МАИ. 2020. № 112. С. 1-18.

16. Kendall M.G., Stuart A. The advanced theory of statistics. London: «Griffin», 1969. 676 с.

17. Chaddock R.E. Principles and methods of statistics. Boston «Houghton Mifflin Company», 1925. 471 с.

## References

1. Grachev Y.L., Sidorenko V.G. Tasks of steganalysis automation. In: Proceedings of the II International Science and Practice Conference Intelligent Transportation Systems (May 25, 2023). Moscow: RUT MIIT; 2023. Pp. 450-457. (in Russ.)

2. Konakhovich G.F., Puzyrenko A.Y. [Computer steganography. Theory and practice]. Kiev: MK-Press; 2006. (in Russ.)

3. Fridrich J. Steganography in Digital Media. Principles and Applications. Cambridge: Cambridge University Press; 2010.

4. Grachev Ya.L., Sidorenko V.G. [Using steganalysis to ensure the integrity of information in intelligent transport systems]. In: [Proceedings of the International Science and Practice Conference Intelligent Transportation Systems] (May 26, 2022). Moscow: RUT MIIT; 2023. Pp. 389-396. (in Russ.)

5. Grachev Ya.L., Sidorenko V.G. Steganalysis of the methods of concealing information in graphic containers. *Dependability* 2021;21(3):39-46.

6. Westfeld A., Pfizmann A. Attacks on Steganographic Systems. Dresden University of Technology, Department of Computer Science. Dresden (Germany); 1999. DOI: 10.1007/10719724\_5.

7. Fridrich J., Goljan M., Du R. Reliable Detection of LSB Steganography in Color and Grayscale Images. Binghamton University, New York (USA); 2001. DOI: 10.1145/1232454.1232466.

8. Belim S.V., Vilkhovsky D.E. Koch-Zhao algorithm steganalysis. *Mathematical Structures and Modeling* 2018;4(48):113-119. DOI: 10.25513/2222-8772.2018.4.139-119. (in Russ.)

9. Monich Yu.I., Starovoitov V.V. [Quality assessments for the analysis of digital images]. *Iskusstvenny intellekt* 2008;4:376-386. (in Russ.)

10. Grachev Ya.L., Sidorenko V.G. [Using statistical characteristics of an image to improve the results of steganalysis]. In: [Proceedings of the III International Science

and Practice Conference Intelligent Transportation Systems] (May 30, 2024). Pp. 563-569. (in Russ.)

11. Novikov A.I., Pronkin A.V. Methods for image noise level estimation. *Computer Optics* 2021;45(5): 713-720. (in Russ.)

12. Wang X., Tian B., Liang C. et al. Blind Image Quality Assessment for Measuring Image Blur. In: Proceedings of 2008 Congress on Image and Signal Processing (27-30 May 2008) 2008;1:467-470.

13. Monich Y.I., Starovoitov V.V. Measure of digital image blur evaluation. *Doklady BGUIR* 2011;1(55):80-84. (in Russ.)

14. Golub Yu.I., Starovoitov F.V. Study of local assessments of contrast for digital images. *Sistemny analiz* 2019;2:4-11. (in Russ.)

15. Timoshenko A.V., Koshkarov A.S. Comparative analysis of entropic metrics of space objects optical images informativity. *Trudy MAI* 2020;112:1-18. (in Russ.)

16. Kendall M.G., Stuart A. The advanced theory of statistics. London: Griffin; 1969.

17. Chaddock R.E. Principles and methods of statistics. Boston: Houghton Mifflin Company; 1925.

## Сведения об авторах

Грачев Ярослав Леонидович (Yaroslav L. Grachev) – аспирант, Российский университет транспорта (*Russian University of Transport (MIIT)*), Российская Федерация, Москва, e-mail: yaroslav446@mail.ru.

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

## About the authors

**Yaroslav L. Grachev**, postgraduate student, Russian University of Transport (MIIT), Russian Federation, Moscow, e-mail: yaroslav446@mail.ru.

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

## Вклад авторов в статью

Грачев Я.Л. – исследование методики комплексного стегоанализа в части использования качественных оценок изображения для увеличения эффективности, формирование тестовых выборок изображений, подсчеты корреляции, анализ результатов.

Сидоренко В.Г. – анализ оценки эффективности предложенной методики.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## 6-я Евразийская конференция «Методология и практика минимизации природных и техногенных рисков изменения климата» Eurasian RISK-2024

С 27 по 29 ноября 2024 года в Азербайджане (г. Баку) состоялась 6-я Евразийская конференция «Методология и практика минимизации природных и техногенных рисков изменения климата» (Eurasian RISK-2024, <https://www.eurasianrisk2024.com>), прошедшая под эгидой 29-ой конференции ООН по изменению климата (COP29) на площадке Азербайджанского Технологического Университета (АзТУ). Среди организаторов конференции Международная компания AMIR Technical Services, Азербайджанский Технологический Университет, Азербайджанская Государственная Морская Академия, Mines Paris – PSL, France, Politecnico di Milano, Italy, City University of Hong Kong, European Safety and Reliability Association (ESRA), Gnedenko e-Forum и др.



В работе конференции приняли участие и выступили с докладами Лауреаты Нобелевской премии мира профессор Святослав Тимашев и профессор Елена Никитина, а также профессор Стамбульского технического

университета Ахмет Дюрюш Шахин. По видеоконференцсвязи к участникам и гостям обратился сопредседатель организационного комитета конференции из США, профессор Университета Кеттеринга Боян Дмитров.





Конференция началась с исполнения Государственного гимна Азербайджана. Выступая на церемонии открытия, ректор Азербайджанского технического университета (АзТУ) профессор Вилаят Велиев рассказал о важности проведения COP29 в Азербайджане и важности вопросов, обсуждаемых на мероприятиях, проводимых в этих рамках. Ректор сообщил, что АзТУ приступит к реализации нового проекта в рамках «Устойчивого университета» как вклада в Цели устойчивого развития ООН. Он отметил, что проект, который будет реализован в сфере возобновляемой энергетики, связан с обеспечением зеленой энергией Парка зеленых технологий, который будет создан АзТУ на территории в один гектар.

Благодаря реализации проекта АзТУ будет автономно обеспечивать нужды своего кампуса зеленой энергией, а также снабжать энергией близлежащие объекты.

В ходе конференции обсуждены вопросы по следующим ключевым направлениям:

**1. Безопасность сложных технических, социотехнических, киберфизических и транспортно-логистических систем в условиях нарастающих климатических изменений.** По мере нарастания частоты и силы опасных климатических явлений актуализируются вопросы обеспечения безопасности объектов и сооружений, расположенных в открытой природной среде и подверженных непосредственному климатическому

воздействию. Нарушение штатного функционирования таких сложных систем в условиях климатических рисков и неопределенностей создает дополнительные риски техногенных инцидентов и катастроф. Рассмотрены теоретические и практические аспекты обеспечения безопасной эксплуатации и живучести, изучения цикличности процессов, на поиске и обосновании эффективных и результативных проектных решений на всех стадиях жизненного цикла и с охватом цепочек поставок.

**2. Снижение рисков стихийных бедствий климатического происхождения.** Последние десятилетия характеризуются усилением трансформации глобальной климатической системы. Нарастает частота чрезвычайных ситуаций вследствие опасных климатических явлений чрезвычайной интенсивности. Селевые потоки и камнепады на горных территориях, катастрофические наводнения на побережьях, масштабные засухи и угрозы голода – далеко не полный перечень угроз жизни людей, целостности и нормальной эксплуатации объектов экономики и жизнеобеспечения. Усиливается нагрузка на службы чрезвычайных ситуаций, растут затраты на ликвидацию последствий и компенсации. Рассмотрены различные аспекты повышения защищенности гражданского населения, объектов экономики и жизнеобеспечения от стихийных бедствий климатического характера и их последствий. Обсуждены меры инженерной защиты, вопросы результативности деятельности служб





чрезвычайных ситуаций и повышения их потенциала, а также адекватные планировочные решения и превентивные меры по предупреждению (избеганию) аварий и катастроф.

**3. Обеспечение устойчивости (resilience) пространственного развития в сложившейся климатической реальности.** Нарастание изменения и изменчивости климата практически повсеместно влечет деформацию привычных условий хозяйствования и жизнеобеспечения. Города, поселения и территории находятся в напряженном поиске нового устойчивого баланса хозяйственной деятельности бизнеса и землепользования. Однако путь у каждого свой. В городах и поселениях, под воздействием волн жары, неблагоприятных метеорологических явлений наблюдается рост рисков здоровью. Для сельских территорий потеря биоразнообразия, инвазивные агрессии, деградация экосистем и потеря экосистемных услуг несут угрозу выживания

местных сообществ, создают риски продовольственной безопасности. Ужесточение карбонового регулирования снижает жизнеспособность бизнеса. Актуализируются инвестиционные аспекты климатической повестки дня, нарастает потребность в расширении сферы климатического страхования, требуется новая система оценки климатической адаптации и митигации. Отмечено, что ожидают теоретического обоснования и практических механизмов реализации вопросы восприятия климатических рисков людьми и сообществами. Обсуждены практические шаги в направлении повышения значения этики Жизни, эволюционных изменений институциональных систем, поиска научно обоснованных решений по комплексному развитию территориальных инфраструктур (водной, дорожной, зеленой), разработки на этой основе стратегий развития умных городов и регионов, в том числе с использованием искусственного интеллекта и т.п.

д.т.н., **А.В. Бочков**

## **ДЕКЛАРАЦИЯ**

### **Шестой Евразийской конференции РИСК-2024**

#### **под эгидой ООН COP29**

#### **«Инновации в минимизации природных и техногенных рисков»**

#### **изменения климата: методология и практика»**

27-29 ноября 2024 г., Баку (АЗЕРБАЙДЖАН)

Глобальное изменение климата представляет собой величайшую экзистенциальную угрозу существованию человечества. Конференция COP29, как и Стокгольмская конференция 1972 года, обсуждала эту угрозу с точки зрения стран (сверху вниз), а конференция РИСК-2024 обсуждала ту же проблему с точки зрения экспертного научного сообщества (снизу вверх), тем самым дополняя COP29. Данная декларация дополняет решения COP29 в части вовлечения каждого жителя Земли в повседневную целенаправленную деятельность, связанную с решением задач и проблем снижения воздействия технологических выбросов парниковых газов на биосферу Земли.

Мы, участники и организаторы 6-й Евразийской конференции «Инновации в минимизации природных и техногенных рисков изменения климата: методология и практика» (RISC-2024) под эгидой COP29 из 38 стран мира, встретились в Баку (Азербайджан) с 27 по 29 ноября 2024 года, понимая необходимость разработки единого риск-ориентированного подхода и общих принципов устойчивого развития в сохранении и улучшение среды обитания человека, заявляем, что

• Сохранение и улучшение качества среды обитания человека в условиях изменения климата – важный вопрос, влияющий на благосостояние народов и эконо-

мическое развитие всех стран мира, выражение воли народов всего мира и долг всех правительств.

• Мы подтверждаем нашу приверженность играть активную роль в формировании национальных и межправительственных механизмов для обеспечения безопасности населения и территорий. Мы считаем важным привлечь все заинтересованные стороны к анализу, оценке и управлению рисками изменения климата.

• Выражаем обеспокоенность продолжающимися неконтролируемыми выбросами парниковых газов в атмосферу Земли и масштабами потерь от аварий и катастроф, вызванных изменением климата и техногенными катастрофами, и призываем к совместным усилиям ученых и специалистов стран Евразии по повышению эффективности и ответственности решений по минимизации рисков возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера.

• Евразийская платформа рисков, созданная компанией «АМИР Технические Сервисы», имеющая опыт успешного проведения шести многосторонних конференций, ставших эффективной площадкой для генерации идей и смыслов теории рисков, поиска путей стимулирования инноваций для минимизации суще-

ствующих и возникающих рисков изменения климата, заявляет, что является Международным Координационным Центром grass root инициативы «Зеленая планета 2060» (GPM 2060).

- Цель инициативного движения «Зеленая планета 2060» мы определяем как развитие междисциплинарного подхода к риск-ориентированному управлению интеллектуальными социотехническими инфраструктурами и территориями и поиск устойчивого развития в условиях изменения климата.

- Для достижения этой цели инициативное движение «Зеленая планета 2060» намерено внести вклад в накопление и распространение инновационных и передовых знаний о климатических, природных и антропогенных рисках, а также технологий и методов борьбы с ними (1) минимизация выбросов парниковых газов, (2) локальное и атмосферное связывание углекислого газа, (3) опережающее развитие низкоуглеродных источников энергии, (4) методы обеспечения безопасности сельскохозяйственных почв и поддержания их плодородия, (5) инновационный подход к выявлению различных рисков, связанных с климатом, и (6) разработка инновационных подходов к смягчению последствий изменения климата и адаптации к ним.

- Устойчивое развитие и управление рисками являются императивными областями исследований, которые пересекаются и влияют друг на друга. Устойчивое развитие определяется как развитие, которое удовлетворяет потребности настоящего времени, не ставя под угрозу способность будущих поколений удовлетворять свои собственные потребности.

- Управление рисками, в свою очередь, играет ключевую роль в достижении устойчивого развития путем принятия научно обоснованных решений (что крайне важно), минимизации негативного воздействия

на экосистемы и сообщества и повышении устойчивости развития.

- Инновационное движение «Зеленая планета 2060» будет способствовать взаимопониманию и углублению профессионального взаимодействия между заинтересованными сторонами отраслей промышленности, научными и академическими учреждениями для минимизации рисков изменения климата и обеспечения безопасности населения и устойчивого социально-экономического развития регионов Евразийского континента.

- Считаем важным установить органическую связь между минимизацией рисков изменения климата, чрезвычайных ситуаций и устойчивым развитием стран, вовлечение всех заинтересованных сторон и широкой общественности в анализ, оценку и управление рисками, включая популяризацию идей устойчивого развития во всех средствах массовой информации, образовательной и научной среде.

- Мы будем полностью поддерживать дальнейшее развитие инновационных позиций и действий в рамках многостороннего и регионального сотрудничества и обмена лучшими практиками и решениями в области снижения риска изменения климата на основе основных решений и итогов COP29.

- Евразийская платформа рисков, «АМИР Технические Сервисы», Гнеденко Форум и НИЦ «Надежность и безопасность больших систем и машин УрО РАН» заявляют об учреждении международного журнала устойчивого развития и управления рисками (International Journal of Sustainability and Risk Management), целью которого является публикация последних теоретических и эмпирических исследований и комментариев по вопросам коммуникации, регулирования и управления рисками в парадигме устойчивого развития.

От имени 6-ой Евразийской конференции РИСК-2024 под эгидой COP-29

Профессор, доктор Вугар Алиев  
Генеральный председатель Оргкомитета конференции,  
Директор компании «AMIR Technical Services»

Профессор, доктор Вилаят Валиев  
Председатель местного Оргкомитета конференции  
Азербайджанского Технического университета

Доктор Александр Бочков  
Гнеденко Форум

Профессор, доктор Святослав Тимашев  
Научно-исследовательский центр «Надежность и безопасность больших систем»  
УрО РАН, Лауреат Нобелевской премии мира 2007 г.

Доктор Елена Никитина  
Институт Мировой Экономики и Международных отношений имени Примакова  
Лауреат Нобелевской Премии мира, 2007г.

Редакционная коллегия журнала «Надежность» с глубоким прискорбием сообщает, что 22 января 2025 года ушёл из жизни один из ведущих специалистов в области теории вероятностей, математической статистики и их приложений, доктор физико-математических наук, профессор, лауреата Государственной премии СССР

## ЮРИЙ КОНСТАНТИНОВИЧ БЕЛЯЕВ

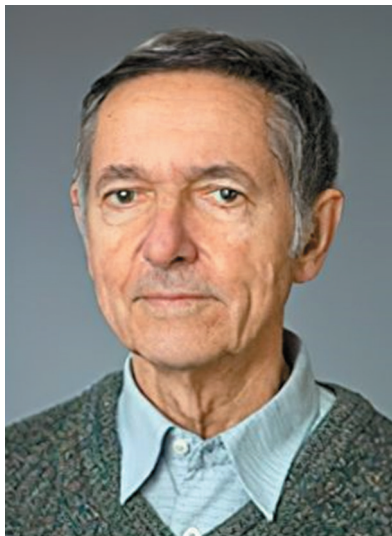
(31 августа 1932, Москва – 22 января 2025, Умео, Швеция)

Ю.К. Беляев родился в Москве. С 1951 по 1956 год был студентом математического отделения механико-математического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова. С 1956 по 1959 год – аспирант Математического института Академии наук СССР (МИАН). В аспирантуре по теме, предложенной его научным руководителем А. Н. Колмогоровым, изучал свойства траекторий гауссовских случайных процессов. В 1960 году защитил кандидатскую диссертацию по этой теме в МИАН.

После защиты докторской диссертации Ю. К. Беляев работал в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова.

Здесь начался длительный период (до середины 1990-х годов) его научного сотрудничества с Б. В. Гнеденко и А. Д. Соловьевым. Область научных интересов в то время сосредоточена на развитии теории надежности, статистических методов контроля качества, теории очередей, моделей надежности. После создания «Кабинета надежности» при Политехническом музее Москвы Ю.К. Беляев читал там лекции по статистическим методам анализа данных испытаний на надежность. Совместная работа с Б. В. Гнеденко и А. Д. Соловьевым над книгой «Математические методы теории надежности» заложила основные направления в исследовании статистических задач теории надежности и статистического контроля качества. Параллельно Ю. К. Беляев продолжал свои исследования свойств точечных процессов. Он перевел и отредактировал известную монографию Д. Кокса и В. Смита по теории восстановления, которая сыграла заметную ключевую роль в развитии, широком распространении и применении этой теории советскими специалистами. Он также дополнил эту монографию прекрасным полным обзором современных (на тот момент) результатов по процессам восстановления.

В 1970 году для получения степени доктора физико-математических наук он защитил соответствующую докторскую диссертацию в Институте прикладной математики (ИПУМ) АН СССР. Диссертация была посвящена случайным точечным процессам, порождаемым случайными полями.



Под его руководством успешно защитили диссертации 24 аспиранта.

Ю.К. Беляев был заведующим отделом теории надежности и массового обслуживания Межфакультетской лаборатории статистических методов МГУ. Позднее этот отдел был преобразован в Лабораторию теории вероятностей при кафедре теории вероятностей механико-математического факультета МГУ. Ю.К. Беляев являлся членом редколлегии научных журналов «Техническая кибернетика» и «Statistics».

Бурное развитие вычислительной техники и численных методов обоснованно вызвало потребность в новых подходах в приложениях.

Для решения задач оценки точности статистических выводов, таких как исследование распределений точечных оценок, смещений, различных классификаторов, выбор функции регрессии при наличии объясняющих переменных и др. Ю. К. Беляев дал теоретическое обоснование правомерности вариантов интенсивного использования вычислений при решении ряда таких задач.

Профессор Беляев приглашался для преподавания и проведения исследований в университеты Берлина и Магдебурга (Германия), Софии (Болгария), Лунда и Умео (Швеция). С 1993 года он являлся профессором Университета Умео, где руководил более чем 30 докторантами.

Ю. К. Беляев – лауреат Государственной премии СССР, член Международного статистического института (ISI) и Института математической статистики (IMS). Автор более 200 научных публикаций, в том числе 5 книг.

С момента создания Гнеденко Форума Ю. К. Беляев являлся его неизменным почетным президентом. Во многом благодаря его поддержке и вниманию Форум получил международное признание и активно работает уже более 20 лет.

Имя Юрия Константиновича Беляева останется в истории теории вероятностей, статистики и ее многочисленных приложений. Он останется в памяти всех, кто его знал и работал с ним.

Светлая ему память.



## Редакция рекомендует

### На пути к формализму риска. Безопасность и устойчивость функционирования умных экспансивных систем



ISBN 978-5-9729-2373-1

Автор: Бочков А.В.

Издательство: Инфра-Инженерия

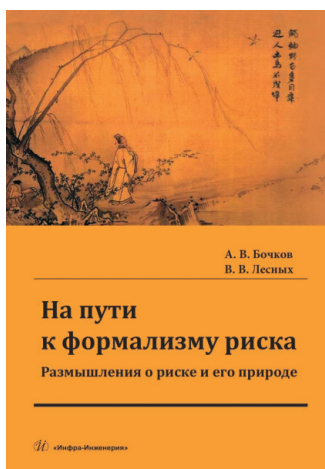
Объем 348 с.

Год: 2025

Представлена методология обеспечения безопасности и устойчивости функционирования особого класса структурно-сложных систем – умных экспансивных систем, направленная на прогнозирование и снижение риска возникновения чрезвычайных ситуаций, нарушающих условия жизнедеятельности людей. Методология оперирует пятью ключевыми, неразрывно связанными между собой методами, решающими задачи, возникающие при построении подсистем, обеспечивающих безопасность и устойчивость рассматриваемого класса структурно сложных систем в условиях возникновения нештатных и чрезвычайных ситуаций природного, техногенного и антропогенного характера. В отличие от существующих подходов рассматривается невероятная постановка, что оправдано для редких событий, какими являются чрезвычайные ситуации и противоправные акции. Разработан метод, обеспечивающий поддержку принятия решения в так называемой задаче группового выбора объектов критически важной инфраструктуры, требующих повышенного внимания службы безопасности и затрат ресурсов государства и собственника системы на обеспечение их защищенности, безопасности и устойчивости функционирования. Разработан и теоретически обоснован метод построения интегрального показателя безопасности, позволившего решить задачу построения оптимальных процессов дискретной обработки непрерывных данных, поступающих от системы, снизить размерность её описания с целью повышения оперативности принятия управляющих решений, обеспечивающих её устойчивое функционирование при наличии внешних негативных воздействий различной природы. Для широкого круга научных работников и специалистов в области анализа, оценки и управления рисками.



### На пути к формализму риска. Размышления о риске и его природе



ISBN 978-5-9729-2146-1

Авторы: Бочков А.В., Лесных В.В.

Издательство: Инфра-Инженерия

Объем 296 с.

Год: 2024

Кажется, мы знаем о риске почти всё и в то же время ничего. Сконцентрировавшись на этимологии слова «риск», исследователи часто упускают из виду его природу, причины и характеристики. В то же время в разных ситуациях риск проявляется по-разному и может быть как характеристикой случайного события, так и характеристикой и мерой качества процесса, протекающего во времени. В последнем случае риску присущи свойства волнового процесса, что требует поиска иных мер, кроме вероятностных, для его измерения и оценки. В данной работе сделана попытка обобщить наиболее характерные различные проявления риска и предложить способы оценки риска, учитывающие эти различия. Книга может рассматриваться как приглашение к дискуссии о природе риска и о том, как может быть построен его формализм. Для широкого круга научных работников и специалистов в области анализа, оценки и управления рисками.



## Надежность, риски, безопасность систем управления на железнодорожном транспорте



ISBN 978-5-9729-1992-5

Авторы: Шубинский И.Б., Розенберг Е.Н., Бочков А.В.

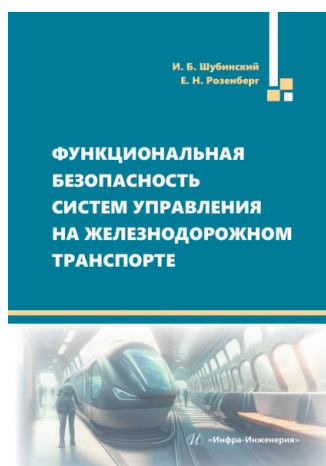
Издательство: Инфра-Инженерия

Объем: 416 с.

Год: 2024

Центральное внимание уделено вопросам обеспечения структурной и особенно функциональной надежности. Обсуждается специфика терминологии в данной области. Представлена методологическая основа прогнозирования редких опасных событий (отказов). Рассмотрен комплекс математических моделей и методов, различных метрик для проверки качества построенных моделей. Большое внимание уделено вопросам нормирования показателей надёжности. Представлены результаты современных исследований авторов в области безопасности движения поездов, включая информационную безопасность. Для широкого круга научных работников, специалистов железнодорожной отрасли, связанных с процессами управления, а также для профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов вузов железнодорожного транспорта.

## Функциональная безопасность систем управления на железнодорожном транспорте



ISBN 978-5-9729-1553-8

Авторы: Шубинский И.Б., Розенберг Е.Н.

Издательство: Инфра-Инженерия

Объем: 360 с.

Год: 2023

Представлен широкий спектр вопросов функциональной безопасности – от научных основ (понятий, постулатов, принципов) до методов и способов обеспечения безопасности технических средств и программного обеспечения систем управления на железнодорожном транспорте, включая прогрессивные методы обеспечения безопасности с помощью виртуальных каналов и цифровых двойников. Значительное внимание уделено методологии подтверждения соответствия требованиям функциональной безопасности. Для широкого круга научных работников, специалистов железнодорожной отрасли, связанных с процессами управления, профессорско-преподавательского состава, аспирантов и студентов вузов железнодорожного транспорта. Может представлять интерес специалистам, студентам и преподавателям других отраслей.

## Надежность и безопасность программного обеспечения



ISBN 978-5-534-05142-1

Авторы: Казарин, О. В. Шубинский И.Б.

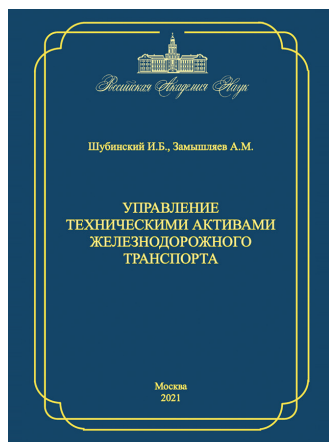
Издательство: Москва, Издательство Юрайт

Объем: 342 с.

Год: 2024

В курсе изложены теоретические и практические основы создания надежного и безопасного программного обеспечения информационных систем. Приведены правила, этапы и технологии построения надежного программного обеспечения. Рассмотрены требования к функциональной надежности и архитектуре программного обеспечения критически важных систем, методы защиты программного обеспечения от вредоносных программ, методы обеспечения безопасности программ, реализуемые на этапах испытания программных комплексов, методы и средства тестирования и защиты программ от исследования недобросовестными конкурентами и злоумышленниками. Представлены нормативные документы, регулирующие деятельность в данной сфере, а также процедуры подтверждения соответствия надежности и безопасности программного обеспечения современных информационных систем требованиям российских регуляторов.

## Управление техническими активами железнодорожного транспорта



ISBN 975-5-902928-89-8

Авторы: Шубинский И.Б., Замышляев А.М.

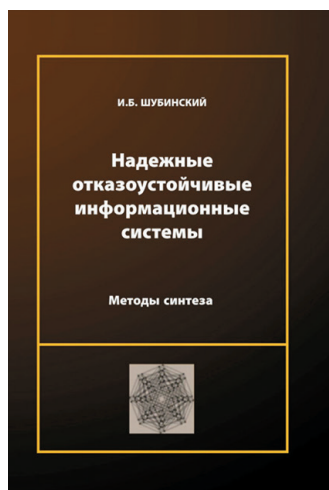
Издательство: М.: ВИНТИ РАН

Объем 248с.

Год: 2021

В книге изложены ключевые положения системы управления техническими активами на основе УРРАН- методологии управления ресурсами, рисками путем анализа и обеспечения требуемых уровней надежности и безопасности объектов железнодорожного транспорта. Приведены базовые понятия и показатели надежности и функциональной безопасности объектов, эталонирование этих объектов транспорта и нормирование показателей их надежности. Приведены основы управления техническими, технологическими и техногенными рисками на железнодорожном транспорте, представлены основы управления ресурсами, а также методики оценки деятельности структурных подразделений инфраструктуры и подвижного состава. Представлена архитектура единой корпоративной платформы информационной системы УРРАН (ЕКП УРРАН) и ее подсистем для комплексов объектов транспорта. Показаны перспективы развития ЕКП УРРАН, особенно в части применения искусственного интеллекта для прогнозирования опасных событий в работе инфраструктуры. Книга рассчитана, в первую очередь, на специалистов, занимающихся практической работой по техническому содержанию объектов железнодорожного транспорта. Она предназначена студентам, аспирантам железнодорожных вузов и может быть также полезна специалистам, студентам и преподавателям других отраслей.

## Надежные отказоустойчивые информационные системы. Методы синтеза



ISBN 978-5-7572-0399-7

Автор: Шубинский И. Б.

Издательство: Ульяновск: Печатный двор; М.: Надежность

Объем: 546 с.

Год: 2016

В книге приведены концептуальные положения обеспечения структурной и функциональной надежности информационных систем на всех стадиях их жизненного цикла. Различные виды структурного резервирования рассмотрены с учетом ограничений в обнаружении отказов. При этих условиях установлены предельные возможности структурного резервирования в предположении бесконечного количества резервных устройств. . Представлены теоретические и практические положения адаптивной отказоустойчивости (активной защиты) информационных систем, в том числе методы и дисциплины активной защиты, способы ее практической реализации. Предложен метод синтеза активной защиты. Оценена эффективность активной защиты по отношению к традиционным методам структурного резервирования. Для широкого круга научных работников и специалистов в области информационной техники.

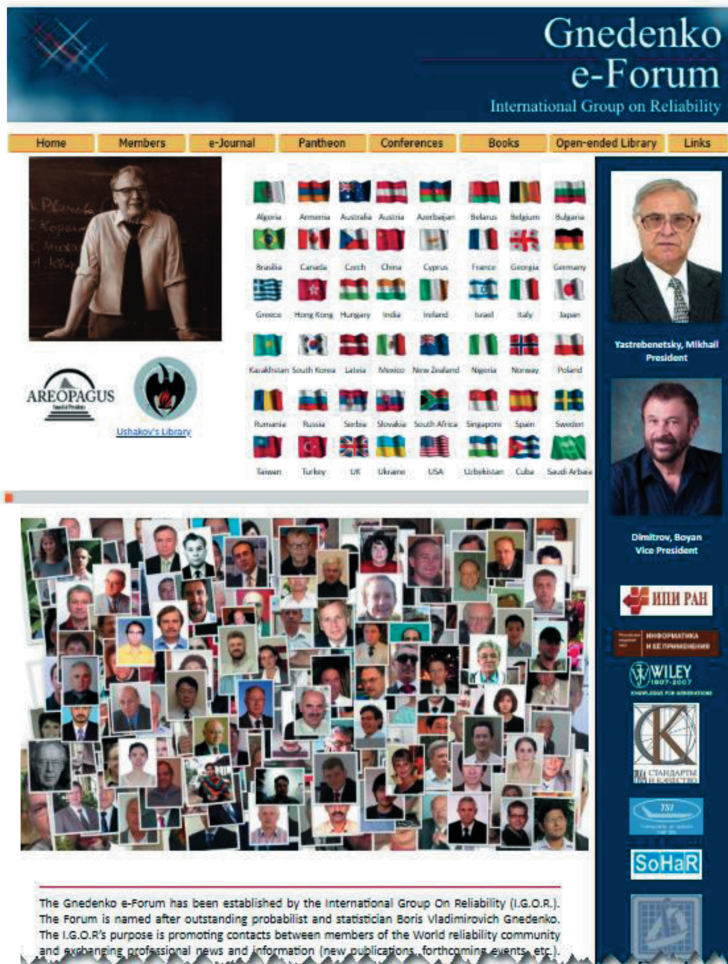






# GNEDENKO FORUM

INTERNATIONAL GROUP ON RELIABILITY



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>

[www.gnedenko.net](http://www.gnedenko.net)

## ЗАЯВКА НА ПОДПИСКУ НА ЖУРНАЛ «НАДЕЖНОСТЬ»

с № \_\_\_\_\_ 20\_\_ г. по № \_\_\_\_\_ 20\_\_ г., количество экз. \_\_\_\_\_

|                                                             |  |
|-------------------------------------------------------------|--|
| Полное наименование<br>организации                          |  |
| Юридический адрес<br>предприятия<br>(индекс, страна, адрес) |  |
| Почтовый адрес<br>предприятия<br>(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, межстрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «полужирный». Точка в конце не ставится.

**Пример:**

**Повышение надежности электронных компонентов**  
**The Increasing of dependability of electronic components**

### 2) Фамилия И.О. автора (авторов)

Данный структурный элемент для каждого автора включает:

- на русском языке – его фамилию и инициалы, после которых указывается сноска в виде цифры, набранной верхним индексом (надстрочным), которая ссылается на указание места работы автора. У фамилии автора, который будет контактировать с редакцией, также верхним индексом (после цифры) указывается символ «\*»;

- на английском языке – его фамилию, имя и отчество в формате «Имя, инициал отчества, фамилия» (Ivan I. Ivanov). Фамилию на английском языке необходимо указывать в соответствии с заграничным паспортом или так, как она была указана в ранее опубликованных статьях. Если автор не имеет заграничного

паспорта и/или публикаций, для транслитерации фамилии и имени необходимо использовать стандарт BSI.

**Оформление:** Текст ФИО набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, межстрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «полужирный». ФИО разделяются запятой, точка в конце не ставится.

**Пример:**

**Иванова А.А.<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, межстрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный». Каждое место работы – с новой строки, точки в конце не ставятся.

**Пример:**

<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, межстрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный», все символы – строчные. Перед адресом набирается символ сноски «\*». Точка в конце не ставится.

**Пример:**

\*petrov\_vv@aaa.ru

### 5) Резюме статьи

Данный структурный элемент включает структурированную аннотацию статьи объемом не менее 350 слов и не более 400 слов. Резюме представляется на русском и английском языках. Резюме должно содержать (желательно в явной форме) следующие разделы: Цель; Методы; Результаты; Выводы (на англ. яз.: Objective, Methods, Results, Conclusion). В резюме статьи не следует включать впервые введенные термины, аббревиатуры (за исключением общеизвестных), ссылки на литературу.



**Оформление:** Текст резюме набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный», кроме слов «Резюме.», «Цель.», «Методы.», «Выводы.» («Objective.», «Methods.», «Results.», «Conclusion.»), которые (вместе с точкой) должны иметь начертание шрифта «полужирный». Текст резюме на отдельные абзацы не разделяется (набирается в один абзац).

**Пример (на рус. яз.):**

**Резюме.** Цель. Предложить подход ... с учетом современных методик. **Методы.** В статье применяются методы математического анализа, ..., теории вероятностей. **Результаты.** С использованием предложенного метода получено... **Заключение.** Предлагаемый в статье подход позволяет...

## 6) Ключевые слова

Указывается 5-7 слов по теме статьи. Желательно, чтобы ключевые слова дополняли резюме (аннотацию) и название статьи. Ключевые слова указываются на русском и английском языках.

**Оформление:** Текст набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный», кроме слов «Ключевые слова:» («Keywords:») которые (вместе с двоеточием) должны иметь начертание «полужирный». Текст на отдельные абзацы не разделяется (набирается в один абзац). В конце ставится точка.

**Пример (на рус. яз.):**

**Ключевые слова:** надежность, функциональная безопасность, технические системы, управление рисками, техническая эффективность.

## 7) Текст статьи

Рекомендуется структурировать текст статьи в виде следующих разделов: Введение, Обзор источников, Методы, Результаты, Обсуждение, Заключение (или выводы). Рисунки и таблицы включаются в текст статьи (положение рисунков должно быть «в тексте», а не «за текстом» или «перед текстом»; без «обтекания текстом»).

**Оформление:**

Заголовки разделов набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, с абзацным отступом слева 1,25 см. Начертание шрифта «полужирный». Заголовки разделов (кроме введения и заключения (выводов)) могут иметь нумерацию арабскими цифрами с точкой после номера раздела. Номер с точкой отделяются от заголовка неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar).

Текст разделов набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, с абзацным отступом слева 1,25 см. Начертание шрифта «обычный» Текст разде-

лов разделяется на отдельные абзацы. Абзацный отступ не применяется для абзаца, следующего за формулой и содержащего пояснения к формуле, например:

где  $n$  – количество изделий.

**Пример:**

### 1. Состояние вопроса повышения надежности электронных компонентов

Проведенный анализ отечественной и зарубежной литературы по теме исследования показал, что...

Рисунки (фотографии, скриншоты) должны быть хорошего качества, пригодные для печати. Разрешение рисунка – не хуже 300 dpi. Если рисунок представляет собой схему, диаграмму, чертеж и т.п., то желательно вставлять такой рисунок в текст в редактируемом формате (MS Visio). Все рисунки должны иметь подрисовочные подписи. Рисунки нумеруются арабскими цифрами, по порядку следования в тексте. Если рисунок в тексте один, то он не нумеруется. Отсылки на рисунки оформляются следующим образом: «На рис. 3 указано, что ...» или «Указано, что ... (см. рис. 3)». Сокращение «рис.» и номер рисунка (если он есть) всегда разделяются неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar). Подрисовочная подпись включает порядковый номер рисунка и его название. Располагается на следующей строке после рисунка и выравнивается по центру:

### Рис. 2. Описание жизненно важных процессов

Точка после подрисовочной подписи не ставится. При выравнивании по центру абзацный отступ всегда должен отсутствовать! Все обозначения, приведенные на рисунках, необходимо пояснять в основном или подрисовочном тексте. Недопустимы отличия в обозначениях на рисунках и в тексте (включая различие прямых/наклонных символов). При проблемах с версткой рисунков, вставленных в текст, авторы должны по запросу редакции предоставить данные рисунки в графическом формате, в виде файлов с расширениями \*.tiff, \*.png, \*.gif, \*.jpg, \*.eps.

Таблицы должны быть хорошего качества, пригодные для печати. Таблицы должны быть пригодны для редактирования (а не отсканированные или в виде рисунков). Все таблицы должны иметь заголовки. Таблицы нумеруются арабскими цифрами, по порядку следования в тексте. Если таблица в тексте одна, то она не нумеруется. Отсылки на таблицы оформляются следующим образом: «В табл. 3 указано, что ...» или «Указано, что ... (см. табл. 3)». Сокращение «табл.» и номер таблицы (если он есть) всегда разделяются неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar). Заголовок таблицы включает порядковый номер таблицы и ее название. Располагается на строке, предшествующей таблице и выравнивается по центру:

### Табл. 2. Описание жизненно важных процессов

Точка после заголовка таблицы не ставится. При выравнивании по центру абзацный отступ всегда должен отсутствовать! Все обозначения (символы), приведен-

ные в таблицах, необходимо пояснять в основном тексте. Недопустимы отличия в обозначениях в таблице и в тексте (включая различие прямых/наклонных символов).

Математические обозначения в тексте набираются заглавными и строчными буквами латинского, греческого и русского алфавитов. Латинские символы всегда набираются наклонным шрифтом (курсивом), кроме обозначений функций, таких как  $\sin$ ,  $\cos$ ,  $\max$ ,  $\min$  и т.п., которые набираются прямым шрифтом. Греческие и русские символы всегда набираются прямым шрифтом. Размер шрифта основного текста и математических обозначений (включая формулы) должен быть одинаков; верхние и нижние индексы масштабируются в MS Word автоматически.

Формулы могут быть включены непосредственно в текст, например:

Пусть  $y = a \cdot x + b$ , 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.

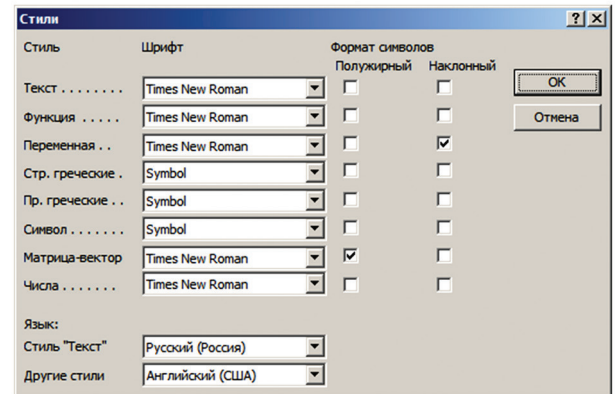
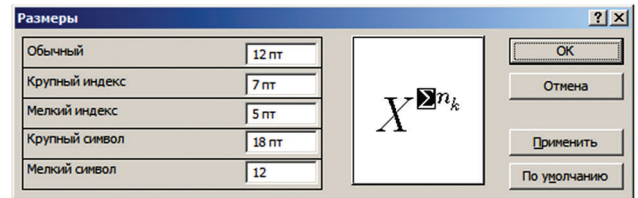
Простые формулы следует набирать без применения формульного редактора (использовать в MS Word русские и латинские буквы, а также меню «Вставка» + «Символ», если требуются греческие буквы и математические операторы), с соблюдением требуемого наклона для латинских символов, например:

$$\Omega = a + b \cdot \theta.$$

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».