

НАУЧНО- ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

В НОМЕРЕ

- СОВМЕСТНЫЕ МЕРЫ ВАЖНОСТИ БИРНБАУМА ДЛЯ ТРЕХ КОМПОНЕНТОВ ВОССТАНОВИМОЙ СИСТЕМЫ С БОЛЬШИМ ЧИСЛОМ СОСТОЯНИЙ
- ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ ИМПУЛЬСНОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА
- ПЕРЕСМОТР РОЛИ ИСПЫТАНИЙ ПРИ НЕРЕГУЛЯРНОМ НАГРУЖЕНИИ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ НАУЧНЫХ ВЫВОДОВ О ПРЕДЕЛЕ ВЫНОСЛИВОСТИ
- МАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ ВЕТРОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ
- ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОБОСНОВАНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ
- АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ СТАНДАРТИЗАЦИИ ТЕРМИНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ РИСКАМИ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ
- ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКА РАБОТЫ МАШИНИСТОВ МЕТРОПОЛИТЕНА
- ФАКТОРЫ НАДЕЖНОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНЫХ ЗАЩИТ



ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПУБЛИКАЦИЙ В ЖУРНАЛЕ «НАДЕЖНОСТЬ»

■ СТРУКТУРНАЯ НАДЕЖНОСТЬ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

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

■ ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ НАДЕЖНОСТЬ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

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

■ ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СИСТЕМ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

- Объект, предмет и цели исследования, показатели функциональной безопасности; функции безопасности, полнота безопасности, терминология в области функциональной безопасности.
- Математические методы и модели задания требований к полноте безопасности и допустимому времени обнаружения опасного отказа, модели функциональной безопасности многоканальных и многоуровневых систем.
- Технологии обеспечения функциональной безопасности систем на всех этапах жизненного цикла.

■ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

- Методы пассивной защиты от отказов, математические модели структурного резервирования, постепенной деградации избыточных систем, маскирования неисправностей, практические результаты применения пассивной защиты от отказов.

- Методы активной защиты от структурных отказов и ошибок в выполнении информационных процессов, принципы и способы активной защиты, теоретические основы активной защиты, технические решения, оценки эффективности активной защиты.

■ УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

- Постулаты и принципы безопасности. Доказательство безопасности. Методы и практические результаты ранжирования опасностей.
- Классификация рисков объектов. Принципы и методы оценивания рисков. Инструменты оценивания рисков. Методы определения допустимых уровней риска. Методология управления рисками. Управление эксплуатационными, техногенными, пожарными, профессиональными, экологическими рисками.
- Интегральные риски. Методы и модели определения интегральных рисков систем. Интегральные риски процессов. Интегральные риски услуг.

■ СЕРТИФИКАЦИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

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

■ ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

- Применение методов искусственного интеллекта в задачах надежности и безопасности.
- Методы и модели Data Science.
- Алгоритмы прогнозирования отказов и опасных событий с помощью технологии Data Science.
- Методы проактивного управления надежностью и безопасностью.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор:

Шубинский Игорь Борисович – доктор технических наук, профессор, эксперт Научного совета при Совете Безопасности РФ, заместитель руководителя Научно-технического комплекса АО «НИИАС» (Москва, РФ)

Заместители главного редактора:

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

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

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

Технический редактор:

Новожилов Евгений Олегович – кандидат технических наук, начальник отдела АО «НИИАС» (Москва, РФ)

Председатель редакционного совета:

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

Сопредседатель редакционного совета:

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

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

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

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

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

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 НП «Объединение производителей железнодорожной техники» (Москва, РФ)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

УЧРЕДИТЕЛИ ЖУРНАЛА:

АО «НИИАС», НП «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

Дубровская А.З.

Адрес: 109029, г. Москва,
ул. Нижегородская, д. 27, стр. 1, оф. 209

ООО «Журнал «Надежность»

www.dependability.ru

Отпечатано в ООО «Отмара. нет». 107140,
г. Москва, Верхняя Красносельская, 2/1, стр. 2,
этаж 2, пом II, ком. 2А, 2Б

Подписано в печать 15.09.2023

Объем , Тираж 500 экз, Заказ №

Формат 60х90/8, Бумага глянец

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

Статьи рецензируются.
Статьи опубликованы в авторской редакции.

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

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:

Разделы журнала и специальности ВАК

- Системный анализ в задачах надежности и безопасности;
- Структурная надежность сложных систем;
- Отказоустойчивость. Теория и практика;
- Живучесть сложных систем;
- Дискуссия по проблемам надежности и безопасности.
(2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки))
- Вопросы автоматизации и управления процессами на транспорте;
- Управление рисками. Теория и практика;
- Функциональная надежность систем управления;
- Функциональная безопасность систем управления.
(2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки))
- Вопросы организационного управления на транспорте;
- Математическое обеспечение управления на транспорте;
- Управление техническими активами;
- Стандартизация и сертификация.
(2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки))
- Транспортные и транспортно- технологические системы;
- Организация производства на транспорте.
(2.9.1. Транспортные и транспортно- технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте (технические науки))
- Интеллектуальные транспортные системы.
(2.9.8. Интеллектуальные транспортные системы (технические науки))
- Применение искусственного интеллекта в задачах надежности и безопасности.
(1.2.1. Искусственный интеллект и машинное обучение (физико-математические науки))
- Вычислительные системы и комплексы. Математическое и программное обеспечение.
(2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки))
- Защита информации.
(2.3.6. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки))
- Математическое и имитационное моделирование, численные методы.
(1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические, технические науки))
- Сообщения – раздел журнала, в который включаются рекламные материалы, объявления о конференциях, семинарах, симпозиумах, выставках, информация о партнерах журнала (Гнеденко Форум и т.д.).

Журнал «Надёжность» входит в категорию К2 перечня рецензируемых научных изданий ВАК (строка 1483), утвержденного информационным письмом Высшей аттестационной комиссии при Минобрнауки России от 6 декабря 2022 № 02-1198 «О категорировании Перечня рецензируемых научных изданий».

СОДЕРЖАНИЕ

Системный анализ в задачах надежности и безопасности

- Чакон В.М., Франсон Э.С., Амрута М.**
Совместные меры важности Бирнбаума для трех компонентов восстанавливаемой системы с большим числом состояний 3

- Бойкова Т.В., Кочнов Ю.О., Петрунин Н.В., Тутнов И.А.** Оценка эксплуатационной надежности импульсного исследовательского реактора 14

- Гадолина И.В.** Пересмотр роли испытаний при нерегулярном нагружении при получении научных выводов о пределе выносливости 23

- Иткин В.Ю.** Марковская модель надежности ветроэлектростанции..... 28

Функциональная безопасность систем управления

- Шубинский И.Б., Розенберг Е.Н.** Общие положения обоснования функциональной безопасности интеллектуальных систем на железнодорожном транспорте 38

Управление рисками. Теория и практика

- Бубликова М.А., Сазонов А.П.** Актуальные вопросы стандартизации терминологии управления рисками на железнодорожном транспорте 46

Интеллектуальные системы управления

- Маркевич А.В., Сидоренко В.Г.** Интеллектуальная система построения графика работы машинистов метрополитена 63

Функциональная надежность систем управления

- Успенский М.И.** Факторы надежности программного обеспечения микропроцессорных защит 73

- Гнеденко – Форум** 78

Совместные меры важности Бирнбаума для трех компонентов восстанавливаемой системы с большим числом состояний

Birnbaum joint importance measures for three components of a repairable multistate systems

Чако В.М.^{1*}, Франсон Э.С.¹, Амрута М.¹
Chacko V.M.^{1*}, Franson A.S.¹, Amrutha M.¹

¹Колледж Святого Фомы (Автономный), Тиссур, Каликутский университет, Керала, Индия, 680001
St. Thomas College (Autonomous), Thrissur, University of Calicut, Kerala, India-680001

*chackovm@gmail.com



Чако В.М.



Франсон Э.С.



Амрута М.

Резюме. В настоящей статье предложены новые совместные меры важности двух и трех компонентов восстанавливаемых систем с большим числом состояний, основанные на классической мере Бирнбаума. При рассмотрении восстанавливаемой системы в качестве первого шага определяются совместные условия важности двух и трех компонентов. Затем измеряются вероятности каждой из важностей. Предложенный метод применяется к набору данных. Приводится иллюстративный пример. Как и в случае с мерой Бирнбаума, предложенные меры имеют общий характер, поскольку зависят от вероятностных свойств компонентов и структуры системы. Эти меры полезны при рассмотрении восстанавливаемых систем.

Abstract. In this paper new measures of joint importance of two and three components for repairable multistate systems based on the classical Birnbaum measure, are proposed. By considering repairable system, first joint relevancy conditions of two and three components are given. Then probabilities of each of the relevancy are measured. The proposed method is applied on a data set. An illustrative example is given. As in the Birnbaum measure, the proposed measures are generic since they depend on the probabilistic properties of the components and the system structure. These measures are useful when consider repairable system.

Ключевые слова: важность Бирнбаума, системы со множеством состояний, восстанавливаемые компоненты, совместные меры важности

Keywords: Birnbaum importance, multistate systems, repairable components, joint importance measures

Для цитирования: Чако В.М., Франсон Э.С., Амрута М. Совместные меры важности Бирнбаума для трех компонентов восстанавливаемой системы с большим числом состояний // Надежность. 2023. №3. С. 3-13. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-3-13>

For citation: Chacko V.M., Franson A.S., Amrutha M. Birnbaum joint importance measures for three components of a repairable multistate systems. Dependability 2023;3: 3-13. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-3-13>

Поступила: 10.03.2023 / **После доработки:** 05.07.2023 / **К печати:** 15.09.2023

Received on: 10.03.2023 / **Revised on:** 05.07.2023 / **For printing:** 15.09.2023

1. Введение

Очень важно определить наиболее важный компонент или группу компонентов в восстанавливаемой сложной системе со множеством состояний на основе вариации, выраженной в таких показателях эффективности, как надежность, готовность или ненадежность/риск и неготовность, либо ожидаемом выходном показателе эффективности и т.д., в то время как вариация происходит в показателях эффективности компонентов. Эта мера будет полезна для получения информации о поведении компонентов, чтобы обеспечить надлежащий ремонт/замену, обеспечивающий соответствие пороговым значениям производительности системы. Надлежащее понимание системы требует измерения изменения производительности системы через изменение совместной производительности компонентов [10–12]. Применительно к системам связи и сетевым системам подход со множеством состояний играет ключевую роль при рассмотрении мероприятий, направленных на повышение надежности. Полное описание, которое может использоваться при анализе систем со множеством состояний, можно найти в литературе (Амруткар (Amrutkar) и Камалья (Kamalha) [1]) и Гриффит (Griffith) [21]).

Приведенные в литературе совместные меры важности применимы к невозможным компонентам и системам. Большинство систем восстанавливаемы, либо их компоненты могут быть отремонтированы/заменены. Основная цель данной работы – предложить совместные меры важности для трех компонентов восстанавливаемых систем в бирнбаумовском смысле. В настоящей статье представлены новые совместные меры важности, которые измеряют эффект взаимодействия трех восстанавливаемых компонентов.

Ссылки на несколько исследовательских работ по мерам важности можно найти у Дуя (Dui) и др. [18]. Разработку мер важности и их использование можно проследить у Бирнбаума (Birnbaum) [3], Фассела (Fussell) и Весли (Vesely) [20], Барлоу (Barlow) и Прошана (Proshan) [2] и Натвига (Natvig) [29]. См. также Натвига (Natvig) [28] и Натвига (Natvig) и Геймира (Gaemyr) [33]. Расширение меры Бирнбаума для систем с двоичными состояниями на системы с множеством состояний можно увидеть в работе Дуя (Dui) и др. [17]. Меры важности для восстанавливаемых систем можно найти у Натвига (Natvig) [30] и Натвига (Natvig) и др. [32]. Исследования по совместным мерам важности можно найти у Чако (Chacko) и Манохарана (Manoharan) [13, 14], Чако (Chacko) [7] и Чако (Chacko) [8]. Боргоново (Borgonovo) и Апостолакис (Apostolakis) [4] обсудили новую меру важности для принятия решений с учетом информации о потенциальных рисках. Цай (Cai) и др. [5] предложили метод оптимизации линейной последовательной системы k -из- n с помощью генетического алгоритма на основе важности Бирнбаума. Цай (Cai) и др. [6] рассмотрели вопрос оптимизацию обслуживания систем с непрерывным состоянием. Алгоритм поиска максимального потока в сети с оценкой мощности приве-

ден в работе Динича (Dinic) [15]. В работе Дуя (Dui) и др. [16] приведены интегральные меры важности на основе полумарковского процесса для систем с множеством состояний. Дуй (Dui) и др. [17] предложили метод обслуживания восстанавливаемых систем с использованием анализа совместной важности на основе производительности системы. Дуй (Dui) и др. [18] представили меры совместной важности компонентов для технического обслуживания системы предупреждения выбросов на подводной лодке. Хьюзби (Huseby) и Натвиг (Natvig) [24] представили передовые методы дискретного моделирования, применяемые к восстанавливаемым системам с множеством состояниями. Хьюзби (Huseby) и Натвиг (Natvig) [25] представили методы дискретного моделирования с выборкой случайных событий с применением к усовершенствованным мерам важности восстанавливаемых компонентов в сетевых системах со множеством состояний. Левитин и Лиснянский [26] провели анализ важности и чувствительности систем со множеством состояний с использованием универсальной производящей функции. В работе Левитина и др. [27] описаны обобщенные меры важности для элементов со множеством состояний, основанные на ограничениях уровня эффективности. Натвиг (Natvig) (2011) представил подробное описание теории надежности систем со множественными состояниями с примерами применения. Натвиг (Natvig) и др. [30] привели примеры применения мер Натвига важности компонентов в восстанавливаемых системах. Рамирес-Маркес (Ramirez-Marquez) и Коит (Coit) [35] ввели новые составные меры важности для систем со множеством состояний с компонентами со множеством состояний. Рамирес-Маркес (Ramirez-Marquez) и Коит (Coit) [36] объяснили анализ критичности компонентов со множеством состояний для повышения надежности систем со множеством состояний. Рамирес-Маркес (Ramirez-Marquez) и др. [37] представили новые идеи касательно критичности и важности компонентов со множеством состояний. Сы (Si) и др. [39] предложили интегрированную меру важности состояний компонентов на основе потери производительности системы. Сы (Si) и др. [40] обсудили интегрированную меру важности связанных систем со множеством состояний для процессов технического обслуживания. Сы (Si) и др. [41] представили интегрированную меру важности на основе состояний компонентов для систем со множеством состояний. Сы (Si) и др. [42] предложили метод распределения и оптимизации надежности системы на основе обобщенной меры важности Бирнбаума. У (Wu) и Кулен (Coolen) [45] представили основанную на стоимости меру важности компонентов системы – расширение меры важности Бирнбаума. У (Wu) и др. [46] использовали важность компонентов для оптимизации правил профилактического обслуживания. Чжу (Zhu) и др. [47] рассмотрели эвристические методы на основе важности Бирнбаума для задач назначения разнородных компонентов. В работе Цю (Zio) и Подифиллини (Podofillini) [48] приводится имитационный анализ методом Монте-Карло влияния важности компонентов со множеством состояний на

различные уровни производительности системы. Цио (Zio) и Подифиллини (Podofillini) [49] обсудили вопрос взаимодействия компонентов в дифференциальной мере важности. Цио (Zio) и др. [50] описали процесс оценки мер важности элементов со множеством состояний с помощью моделирования по методу Монте-Карло. Цио (Zio) и др. [51] привели пример из железнодорожной отрасли того, как производится приоритезация на основе мер важности для улучшения работы систем со множеством состояний.

В настоящей статье предложены общие совместные меры важности для трех компонентов восстанавливаемых систем. Такие меры особенно полезны в случаях, когда инженеру ничего не известно о рабочей среде и других внешних факторах. Мы предполагаем, что каждый компонент проходит периодические жизненные циклы, начиная с наивысшего состояния, а затем проходя через низшие состояния до отказа. Затем они ремонтируются или заменяются, и начинается новый жизненный цикл. Более того, также предполагается возможность ремонта между другими состояниями.

В разделе 2 вводятся новые совместные меры важности. В разделе 3 приводится иллюстративный пример. В заключительном разделе приводятся выводы.

2. Критичность и важность в системах со множеством состояний

В этом разделе рассматриваются новые совместные меры важности для трех компонентов системы с множеством состояний, имеющей n восстанавливаемых компонентов со множеством состояний.

Пусть $X_i(t)$ представляет состояние компонента i в момент времени t , а $\varphi(t)$ представляет состояние системы, где $\varphi(t) = \varphi(X_1(t), \dots, X_n(t))$. Пусть $X_i(t)$ принимает значения $0, 1, \dots, M_i$, $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ и $\varphi(t) = k$; $k \in \{0, 1, 2, \dots, M\}$, $M = \max_{1 \leq i \leq n} \{M_i\}$.

Пусть $X_i^+(t)$ и $X_i^-(t)$ соответственно – следующее и предыдущее состояния компонента i , $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Очевидно, что для $t \in [0, \infty)$

$$X_i^+(t) = \begin{cases} X_i(t) + 1, & X_i(t) < M_i; \\ M_i, & X_i(t) = M_i, \end{cases}$$

$$X_i^-(t) = \begin{cases} X_i(t) - 1, & X_i(t) > 0; \\ 0, & X_i(t) = 0. \end{cases}$$

Если при переходе компонента в следующее или предыдущее состояние происходит изменение состояния системы, то говорят, что в этот момент времени компонент находится в n -критическом или p -критическом состоянии. Компонент i является n -критическим во время перехода компонента в следующее состояние в момент времени t , если

$$\varphi(X_i(t), \mathbf{X}(t)) \neq \varphi(X_i^+(t), \mathbf{X}(t)) \text{ или } \varphi(X_i(t), \mathbf{X}(t)) - \varphi(X_i^+(t), \mathbf{X}(t)) \neq 0.$$

Следовательно, компонент i является n -критичным в момент времени t , если переход компонента в следующее состояние также приведет к изменению состояния системы. Аналогично, мы говорим, что компонент i является p -критичным, в то время как компонент возвращается в свое предыдущее состояние в момент времени t , если

$$\varphi(X_i^-(t), \mathbf{X}(t)) \neq \varphi(X_i(t), \mathbf{X}(t)) \text{ или } \varphi(X_i^-(t), \mathbf{X}(t)) - \varphi(X_i(t), \mathbf{X}(t)) \neq 0.$$

Следовательно, компонент i является p -критичным в момент времени t , если возврат компонента в предыдущее состояние приведет к изменению состояния системы.

Теперь, чтобы измерить эффект совместного движения двух компонентов в любом направлении, рассмотрим следующие утверждения. Предположим, что в момент времени t i -й компонент переходит в следующее состояние и j -й компонент также переходит в следующее состояние. Тогда компоненты i и j являются совместно критичными, если

$$\varphi(X_i(t), X_j(t), \mathbf{X}(t)) - \varphi(X_i^+(t), X_j(t), \mathbf{X}(t)) - [\varphi(X_i(t), X_j^+(t), \mathbf{X}(t)) - \varphi(X_i^+(t), X_j^+(t), \mathbf{X}(t))] \neq 0.$$

Предположим, что в момент времени t i -й компонент переходит в следующее состояние, а j -й компонент переходит в предыдущее состояние. Тогда компоненты i и j являются совместно критичными, если

$$\varphi(X_i(t), X_j^-(t), \mathbf{X}(t)) - \varphi(X_i^+(t), X_j^-(t), \mathbf{X}(t)) - [\varphi(X_i(t), X_j(t), \mathbf{X}(t)) - \varphi(X_i^+(t), X_j(t), \mathbf{X}(t))] \neq 0.$$

Предположим, что i -й компонент возвращается в предыдущее состояние, а j -й компонент переходит в следующее состояние. Тогда компоненты i и j являются совместно критичными, если

$$\varphi(X_i^-(t), X_j(t), \mathbf{X}(t)) - \varphi(X_i(t), X_j(t), \mathbf{X}(t)) - [\varphi(X_i^-(t), X_j^+(t), \mathbf{X}(t)) - \varphi(X_i(t), X_j^+(t), \mathbf{X}(t))] \neq 0.$$

Предположим, что i -й компонент возвращается в предыдущее состояние, а j -й компонент также переходит в предыдущее состояние. Тогда компоненты i и j являются совместно критичными, если

$$\varphi(X_i^-(t), X_j^-(t), \mathbf{X}(t)) - \varphi(X_i(t), X_j^-(t), \mathbf{X}(t)) - [\varphi(X_i^-(t), X_j(t), \mathbf{X}(t)) - \varphi(X_i(t), X_j(t), \mathbf{X}(t))] \neq 0.$$

Теперь, чтобы измерить эффект совместного движения трех компонентов в любом направлении, рассмотрим следующие утверждения. Предположим, что в момент времени t i -й компонент переходит в следующее состояние, j -й компонент также переходит в следующее состояние и k -й компонент также переходит в следующее

состояние. Тогда компоненты i, j и k являются совместно критичными, если

$$\begin{aligned} & \varphi(X_i(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \\ & - \varphi(X_i^+(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \\ & - \left[\varphi(X_i(t), X_j^+(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i^+(t), X_j^+(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) \right] - \\ & - \left[\varphi(X_i(t), X_j(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i^+(t), X_j(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) \right] + \\ & + \left[\varphi(X_i(t), X_j^+(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i^+(t), X_j^+(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) \right] \neq 0. \end{aligned}$$

Предположим, что в момент времени t i -й компонент переходит в следующее состояние, j -й компонент переходит в предыдущее состояние, а k -й компонент переходит в следующее состояние. Тогда i, j и k являются совместно критическими, если

$$\begin{aligned} & \varphi(X_i(t), X_j^-(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \\ & - \varphi(X_i^+(t), X_j^-(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \\ & - \left[\varphi(X_i(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i^+(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) \right] - \\ & - \left[\varphi(X_i(t), X_j^-(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i^+(t), X_j^-(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) \right] + \\ & + \left[\varphi(X_i(t), X_j(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i^+(t), X_j(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) \right] \neq 0. \end{aligned}$$

Предположим, i -й компонент переходит в предыдущее состояние, j -й компонент переходит в следующее состояние и k -й компонент также переходит в следующее состояние. Тогда i, j и k являются совместно критичными, если

$$\begin{aligned} & \varphi(X_i^-(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \\ & - \varphi(X_i(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \\ & - \left[\varphi(X_i^-(t), X_j^+(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i(t), X_j^+(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) \right] - \\ & - \left[\varphi(X_i^-(t), X_j(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i(t), X_j(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) \right] + \\ & + \left[\varphi(X_i^-(t), X_j^+(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i(t), X_j^+(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) \right] \neq 0. \end{aligned}$$

Предположим, i -й компонент переходит в предыдущее состояние, j -й компонент также переходит в предыдущее состояние, а k -й компонент переходит в

следующее состояние. Тогда i, j и k являются совместно критичными, если

$$\begin{aligned} & \varphi(X_i^-(t), X_j^-(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \\ & - \varphi(X_i(t), X_j^-(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \\ & - \left[\varphi(X_i^-(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) \right] - \\ & - [\varphi(X_i^-(t), X_j^-(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) - \\ & - \varphi(X_i(t), X_j^-(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t))] - \\ & - \left[\varphi(X_i^-(t), X_j(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i(t), X_j(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) \right] \neq 0. \end{aligned}$$

Предположим, что в момент времени t i -й компонент переходит в следующее состояние, j -й компонент также переходит в следующее состояние, а k -й компонент возвращается в предыдущее состояние. Тогда i, j и k являются совместно критичными, если

$$\begin{aligned} & \varphi(X_i(t), X_j(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) - \\ & - \varphi(X_i^+(t), X_j(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) - \\ & - \left[\varphi(X_i(t), X_j^+(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i^+(t), X_j^+(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) \right] - \\ & - \left[\varphi(X_i(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i^+(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) \right] + \\ & + \left[\varphi(X_i(t), X_j^+(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i^+(t), X_j^+(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) \right] \neq 0. \end{aligned}$$

Предположим, что в момент времени t i -й компонент переходит в следующее состояние, j -й компонент переходит в предыдущее состояние и k -й компонент также переходит в предыдущее состояние. Тогда i, j и k являются совместно критичными, если

$$\begin{aligned} & \varphi(X_i(t), X_j^-(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) - \\ & - \varphi(X_i^+(t), X_j^-(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) - \\ & - \left[\varphi(X_i(t), X_j(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i^+(t), X_j(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) \right] - \\ & - \left[\varphi(X_i(t), X_j^-(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i^+(t), X_j^-(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) \right] + \\ & + \left[\varphi(X_i(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i^+(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) \right] \neq 0. \end{aligned}$$

Предположим, что i -й компонент возвращается в предыдущее состояние, j -й компонент переходит в

следующее состояние, а k -й компонент возвращается в предыдущее состояние. Тогда i, j и k являются совместно критичными, если

$$\begin{aligned} & \varphi(X_i^-(t), X_j(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) - \\ & - \varphi(X_i(t), X_j(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) - \\ & - \left[\varphi(X_i^-(t), X_j^+(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i(t), X_j^+(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) \right] - \\ & - \left[\varphi(X_i^-(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) \right] + \\ & + \left[\varphi(X_i^-(t), X_j^+(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i(t), X_j^+(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) \right] \neq 0. \end{aligned}$$

Предположим, i -й компонент переходит в предыдущее состояние, j -й компонент также переходит в предыдущее состояние и k -й компонент также переходит в предыдущее состояние. Тогда i, j и k являются совместно критичными, если

$$\begin{aligned} & \varphi(X_i^-(t), X_j^-(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) - \\ & - \varphi(X_i(t), X_j^-(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) - \\ & - \left[\varphi(X_i^-(t), X_j(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i(t), X_j(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) \right] - \\ & - \left[\varphi(X_i^-(t), X_j^-(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i(t), X_j^-(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) \right] + \\ & + \left[\varphi(X_i^-(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) \right] \neq 0. \end{aligned}$$

Для определения совместной важности двух восстановимых компонентов в бирнбаумовском смысле предлагаются следующие меры, предполагающие рассмотрение трех компонентов – i, j и k :

$$I_{\{NNNB\}}^{ij}(t) = P \left\{ \begin{aligned} & \varphi(X_i(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \\ & - \varphi(X_i^+(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \\ & - \left[\varphi(X_i(t), X_j^+(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i^+(t), X_j^+(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) \right] - \\ & - \left[\varphi(X_i(t), X_j(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i^+(t), X_j(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) \right] + \\ & + \left[\varphi(X_i(t), X_j^+(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i^+(t), X_j^+(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) \right] \neq 0 \end{aligned} \right\},$$

$$I_{\{NPNB\}}^{ij}(t) = P \left\{ \begin{aligned} & \varphi(X_i(t), X_j^-(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \\ & - \varphi(X_i^+(t), X_j^-(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \\ & - \left[\varphi(X_i(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i^+(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) \right] - \\ & - \left[\varphi(X_i(t), X_j^-(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i^+(t), X_j^-(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) \right] + \\ & + \left[\varphi(X_i(t), X_j(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i^+(t), X_j(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) \right] \neq 0 \end{aligned} \right\},$$

$$I_{\{PNNB\}}^{ij}(t) = P \left\{ \begin{aligned} & \varphi(X_i^-(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \\ & - \varphi(X_i(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \\ & - \left[\varphi(X_i^-(t), X_j^+(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i(t), X_j^+(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) \right] - \\ & - \left[\varphi(X_i^-(t), X_j(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i(t), X_j(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) \right] + \\ & + \left[\varphi(X_i^-(t), X_j^+(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i(t), X_j^+(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) \right] \neq 0 \end{aligned} \right\},$$

$$I_{\{PPNB\}}^{ij}(t) = P \left\{ \begin{aligned} & \varphi(X_i^-(t), X_j^-(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \\ & - \varphi(X_i(t), X_j^-(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \\ & - \left[\varphi(X_i^-(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) \right] - \\ & - \left[\varphi(X_i^-(t), X_j^-(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i(t), X_j^-(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) \right] - \\ & - \left[\varphi(X_i^-(t), X_j(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i(t), X_j(t), X_k^+(t), \mathbf{X}(t)) \right] \neq 0 \end{aligned} \right\},$$

$$I_{\{NNPB\}}^{ij}(t) = P \left\{ \begin{aligned} & \varphi(X_i(t), X_j(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) - \\ & - \varphi(X_i^+(t), X_j(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) - \\ & - \left[\varphi(X_i(t), X_j^+(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i^+(t), X_j^+(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) \right] - \\ & - \left[\varphi(X_i(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i^+(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) \right] + \\ & + \left[\varphi(X_i(t), X_j^+(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ & \left. - \varphi(X_i^+(t), X_j^+(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) \right] \neq 0 \end{aligned} \right\},$$

$$I_{\{NPPB\}}^{ij}(t) = P \left\{ \begin{array}{l} \varphi(X_i(t), X_j^-(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) - \\ - \varphi(X_i^+(t), X_j^-(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) - \\ - \left[\varphi(X_i(t), X_j(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ \left. - \varphi(X_i^+(t), X_j(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) \right] - \\ - \left[\varphi(X_i(t), X_j^-(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ \left. - \varphi(X_i^+(t), X_j^-(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) \right] + \\ + \left[\varphi(X_i(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ \left. - \varphi(X_i^+(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) \right] \neq 0 \end{array} \right\},$$

$$I_{\{PNPB\}}^{ij}(t) = P \left\{ \begin{array}{l} \varphi(X_i^-(t), X_j(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) - \\ - \varphi(X_i(t), X_j(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) - \\ - \left[\varphi(X_i^-(t), X_j^+(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ \left. - \varphi(X_i(t), X_j^+(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) \right] - \\ - \left[\varphi(X_i^-(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ \left. - \varphi(X_i(t), X_j(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) \right] + \\ + \left[\varphi(X_i^-(t), X_j^+(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ \left. - \varphi(X_i(t), X_j^+(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) \right] \neq 0 \end{array} \right\},$$

$$I_{\{PPPB\}}^{ij}(t) = P \left\{ \begin{array}{l} \varphi(X_i^-(t), X_j^-(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) - \\ - \varphi(X_i(t), X_j^-(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) - \\ - \left[\varphi(X_i^-(t), X_j(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ \left. - \varphi(X_i(t), X_j(t), X_k^-(t), \mathbf{X}(t)) \right] - \\ - \left[\varphi(X_i^-(t), X_j^-(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ \left. - \varphi(X_i(t), X_j^-(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) \right] + \\ + \left[\varphi(X_i^-(t), X_j^-(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) - \right. \\ \left. - \varphi(X_i(t), X_j^-(t), X_k(t), \mathbf{X}(t)) \right] \neq 0 \end{array} \right\}.$$

Очевидно, что в момент t :

$I_{\{NNNB\}}^{ij}(t)$ – вероятность того, что состояние системы изменится, если три компонента – i, j и k перейдут в следующие состояния;

$I_{\{NPNB\}}^{ij}(t)$ – вероятность того, что состояние системы изменится, если компоненты i и k перейдут в следующие состояния, а компонент j перейдет в предыдущее состояние;

$I_{\{PNPB\}}^{ij}(t)$ – вероятность того, что состояние системы изменится, если компонент i перейдет в предыдущее состояние, а компоненты j и k перейдут в следующие состояния;

$I_{\{PPNB\}}^{ij}(t)$ – вероятность того, что состояние системы изменится, если оба компонента i и j перейдут в предыдущие состояния, а компонент k перейдет в следующее состояние;

$I_{\{NNPB\}}^{ij}(t)$ – вероятность того, что состояние системы изменится, если два компонента i и j перейдут в следующие состояния, а компонент k перейдет в предыдущее состояние;

$I_{\{NPPB\}}^{ij}(t)$ – вероятность того, что состояние системы изменится, если компонент i перейдет в следующее состояние, а компоненты j и k перейдут в предыдущие состояния;

$I_{\{PNPB\}}^{ij}(t)$ – вероятность того, что состояние системы изменится, если компоненты i и k перейдут в предыдущие состояния, а компонент j перейдет в следующее состояние;

$I_{\{PPPB\}}^{ij}(t)$ – вероятность того, что состояние системы изменится, если три компонента i, j и k перейдут в предыдущие состояния.

3. Иллюстрация

Пример: Рассмотрим радиосистему, приведенную в статье Чако (Chacko) и др. [10], состоящую из пяти компонентов: чейнджер, тюнер, усилитель, динамик 1 и динамик 2, в которых кроме усилителя все остальные компоненты являются бинарными. Более того, все компоненты считаются восстанавливаемыми. Состояние чейнджера представлено с помощью X_1 , состояние тюнера представлено с помощью X_2 , состояние усилителя представлено с помощью X_3 , состояние динамика 1 представлено с помощью X_4 , а состояние динамика 2 представлено с помощью X_5 . X_3 принимает значения 0, 1 и 2, т.е. усилитель неисправен, частично функционирует и полностью функционирует. Векторы и соответствующее состояние системы приведены в табл. 1.

Табл. 1. Векторы состояния радиосистемы

X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	РНИ	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	РНИ
0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1
1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	1
0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0
0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	1
0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1
1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1
1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1
1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1
0	1	0	1	0	0	0	0	2	0	0	0
0	1	0	0	1	0	1	0	2	0	0	0
0	0	0	1	1	0	0	1	2	0	0	0
1	1	0	1	0	0	0	0	2	1	0	0
1	1	0	0	1	0	0	0	2	0	1	0
1	0	0	1	1	0	1	1	2	0	0	0

X1	X2	X3	X4	X5	PHI	X1	X2	X3	X4	X5	PHI
0	1	0	1	1	0	1	0	2	1	0	1
1	1	0	1	1	0	1	0	2	0	1	1
0	0	1	0	0	0	0	1	2	1	0	1
1	0	1	0	0	0	0	1	2	0	1	1
0	1	1	0	0	0	0	0	2	1	1	0
0	0	1	1	0	0	1	1	2	1	0	1
0	0	1	0	1	0	1	1	2	0	1	1
1	1	1	0	0	0	1	0	2	1	1	1
1	0	1	1	0	1	0	1	2	1	1	1
1	0	1	0	1	1	1	1	2	1	1	1
						24	24	24	24	24	24

Векторы состояний при $X_3=1$ или $X_3=2$ приведены в табл. 2.

Табл. 2. Векторы состояний при $X_3=1$ или $X_3=2$

X1	X2	X3	X4	X5	PHI	X1	X2	X3	X4	X5	PHI
0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0
1	0	1	0	0	0	1	0	2	0	0	0
0	1	1	0	0	0	0	1	2	0	0	0
0	0	1	1	0	0	0	0	2	1	0	0
0	0	1	0	1	0	0	0	2	0	1	0
1	1	1	0	0	0	1	1	2	0	0	0
1	0	1	1	0	1	1	0	2	1	0	1
1	0	1	0	1	1	1	0	2	0	1	1
0	1	1	1	0	1	0	1	2	1	0	1
0	1	1	0	1	1	0	1	2	0	1	1
0	0	1	1	1	0	0	0	2	1	1	0
1	1	1	1	0	1	1	1	2	1	0	1
1	1	1	0	1	1	1	1	2	0	1	1
1	0	1	1	1	1	1	0	2	1	1	1
0	1	1	1	1	1	0	1	2	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1

Среди векторов состояния при $X_3=1$ или $X_3=2$, векторы критического пути приведены в табл. 3.

Табл. 3. Критические векторы для X_3

X1	X2	X3	X4	X5	PHI
1	0	1	1	0	1
1	0	1	0	1	1
0	1	1	1	0	1
0	1	1	0	1	1
1	1	1	1	0	1
1	1	1	0	1	1
1	0	1	1	1	1
0	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1

Среди векторов состояний с $X_3=1$ или $X_3=2$, векторы критического пути для X_4 приведены в табл. 4, векторы критического пути для X_1 и X_4 – в табл. 5 и векторы критического пути для X_2 и X_4 – в табл. 6.

Табл. 4. Критический вектор для X_4 среди критических векторов X_3

X1	X2	X3	X4	X5	PHI
1	0	1	1	0	1
0	1	1	1	0	1
1	1	1	1	0	1

Табл. 5. Критический вектор для X_1 и X_4 среди критических векторов X_3

X1	X2	X3	X4	X5	PHI
1	0	1	1	0	1

Табл. 6. Критический вектор для X_2 и X_4 среди критических векторов X_3

X1	X2	X3	X4	X5	PHI
0	1	1	1	0	1

Пусть $Cr(X_1, X_3, X_4)$ представляет собой множество векторов критического пути при $X_1=1$, $X_3=1$ и $X_4=1$.

Предположим, что $P(X_i = 1) = p_i$ и $P(X_i = 0) = 1 - p_i = q_i$, $i=1,2,4,5$. Также предположим вероятности $P(X_3 = 2) = p_{32}$, $P(X_3 = 1) = p_{31}$ и $P(X_i = 0) = p_{30}$. Тогда

$$\begin{aligned}
 I_{\{NNNB\}}^{134}(t) &= \\
 &= \sum_{Cr(X_3, X_4)} P \left(\varphi(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) = 1 \right) = p_1 q_2 p_{31} p_4 q_5, \\
 I_{\{NNNB\}}^{234}(t) &= \\
 &= \sum_{Cr(X_3, X_4)} P \left(\varphi(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) = 1 \right) = q_1 p_2 p_{31} p_4 q_5.
 \end{aligned}$$

Если заменить $p_i=0,2$, $i=1,5$, $p_i=0,5$, $i=2,4$ и $p_{31}=0,5$, то тогда $I_{\{NNNB\}}^{134}(t)=0,02$ и $I_{\{NNNB\}}^{234}(t)=0,08$.

Из этого следует, что компоненты 2, 3 и 4 совместно более важны, чем компоненты 1, 3 и 4. Аналогичным образом мы можем рассчитать совместные меры важности для всех остальных комбинаций.

4. Выводы

В настоящей статье рассмотрены основы моделирования восстанавливаемых систем со множеством состояний. Физические свойства компонентов и системы рассмотрены как часть таких основ. Однокомпонентная мера важности Бирнбаума обобщается до трехкомпонентной совместной меры важности для систем со множеством состояний восемью различными способами. Эти меры

дают представление об изменениях в производительности системы для поддержки принятия решений по улучшению системы посредством движения компонентов в одинаковом/противоположном направлениях. Эти меры полезны при диагностической проверке. Совместные меры важности очень полезны при рассмотрении восстановимых компонентов.

Библиографический список

1. Amrutkar K.P., Kamalja K.K. An overview of various importance measures of reliability system // *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences*. 2017. Vol. 2(3). Pp. 150-171.
2. Barlow R.E., Proschan F. Importance of system components and fault tree events // *Stochastic Processes and their Applications*. 1975. Vol. 3. Pp. 153-173.
3. Birnbaum Z.W. On the importance of different components in a multicomponent system. In: Krishnaia P.R., editor. *Multivariate analysis – II*. New York: Academic Press, 1969. Pp. 581-592.
4. Borgonovo E., Apostolakis G.E. A new importance measure for risk-informed decision making // *Reliability Engineering & System Safety*. 2001. Vol. 72. Pp. 193-212.
5. Cai Z., Si S., Sun S. et al. Optimization of linear consecutive-k-out-of-n system with a Birnbaum importance-based genetic algorithm // *Reliability Engineering & System Safety*. 2016. Vol. 152. Pp. 248-258.
6. Cai Z., Si S., Liu Y. et al. Maintenance optimization of continuous state systems based on performance improvement // *IEEE Transactions on Reliability*. 2018. Vol. 67(2). Pp. 651-665.
7. Chacko V.M. New Joint Importance Measures for Multistate Systems // *International Journal of Statistics and Reliability Engineering*. 2020. Vol. 7(1). Pp. 140-148.
8. Chacko V.M. On Birnbaum Type Joint Importance Measures for Multistate Reliability Systems // *Communications in Statistics – Theory and Methods*. 2021. Vol. 52(9). Pp. 2799-2818. DOI: 10.1080/03610926.2021.1961000
9. Chacko V.M. On joint importance measures for multistate reliability systems // *Reliability: Theory and Applications*. 2021. Vol. 16. Pp. 286-293.
10. Chacko V.M. On Joint Importance Measures for Multistate System's Reliability // *Operations Research: Methods, Techniques, and Advancements*. 2022. Vol. 4(65). Pp. 286-293.
11. Chacko V.M. On new joint importance measures for multistate reliability systems. In: Chapter 7. *Computational Intelligence in Sustainable Reliability Engineering*. Scrivener Publishing (Wiley), 2022.
12. Chacko V.M. (2022) Birnbaum joint importance measures for repairable multistate systems // *Communications in Statistics – Theory and Methods*. 2023. Vol. 52(9). Pp. 2799-2818.
13. Chacko V.M., Manoharan M. Joint importance measures for the multistate system. In: Verma A.K., Kapur P.K., Ghadge S.G., editors. *Advances in Performance and Safety of Complex systems*. New Delhi: Macmillan. Pp. 308-314.
14. Chacko V.M., Manoharan M. Joint Importance measures for multistate reliability system // *Opsearch*. 2011. Vol. 48(3). Pp. 257-278.
15. Dinic E.A. Algorithm for solution of a problem of maximum flow in a network with power estimation // *Soviet Mathematics – Doklady*. 1970. Vol. 11. Pp. 1277-1280.
16. Dui H., Si S., Zuo M.J. et al. Semi-Markov process-based integrated importance measures for multi-state systems // *IEEE Transactions on Reliability*. 2015. Vol. 64(2). Pp. 754-765.
17. Dui H., Li S., Xing L. et al. System performance-based joint importance analysis guided maintenance for repairable systems // *Reliability Engineering & System Safety*. 2019. Vol. 186. Pp. 162-175.
18. Dui H., Zhang C., Zheng X. Component joint importance measures for maintenances in submarine blowout preventer system // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2020. Vol. 63. Pp. 1-10.
19. Ford L.R., Fulkerson D.R. Maximal flow through a network // *Canadian Journal of Mathematics*. 1956. Vol. 8. Pp. 399-404.
20. Fussell J.B., Vesely W.E. A new methodology for obtaining cut sets for fault trees // *Transactions of the American Nuclear Society*. 1972. Vol. 15. Pp. 262-263.
21. Griffith W. Multi-state reliability models // *Journal of Applied Probability*. 1980. Vol. 17. Pp. 735-744.
22. Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J.E. A review of definitions and measures of system resilience // *Reliability Engineering & System Safety*. 2016. Vol. 145. Pp. 47-61.
23. Huseby A.B., Kalinowska K., Abrahamsen T. Birnbaum criticality and importance measures for multistate systems with repairable components // *Probability in the Engineering and Informational Sciences*. 2022. Vol. 36(1). Pp. 66-86.
24. Huseby A.B., Natvig B. Advanced discrete simulation methods applied to repairable multi-state systems. In: Bris R., Soares C.G., Martorell S., editors. *Reliability, risk and safety. Theory and applications*, Vol. 1. London: CRC Press, 2010. Pp. 659-666.
25. Huseby A.B., Natvig B. Discrete event simulation methods applied to advanced importance measures of repairable components in multistate network flow systems // *Reliability Engineering & System Safety*. 2012. Vol. 119. Pp. 186-198.
26. Levitin G., Lisnianski A. Importance and sensitivity analysis of multistate systems using the universal generating function // *Reliability Engineering & System Safety*. 1999. Vol. 65. Pp. 271-282.
27. Levitin G., Podofillini L., Zio E. Generalised importance measures for multistate elements based on performance level restrictions // *Reliability Engineering & System Safety*. 2003. Vol. 82. Pp. 287-298.

28. Natvig B. A suggestion for a new measure of importance of system components // *Stochastic Processes and their Applications*. 1979. Vol. 9. Pp. 319-330.
29. Natvig B. New light on measures of importance of system components // *Scandinavian Journal of Statistics*. 1985. Vol. 12. Pp. 43-54.
30. Natvig B. Measures of component importance in nonrepairable and repairable multistate strongly coherent systems // *Methodology and Computing in Applied Probability*. 2011. Vol. 13. Pp. 523-547.
31. Natvig B. Multistate systems reliability theory with applications. New York (USA): John Wiley and Sons, Inc., 2011.
32. Natvig B., Eide K.A., Gåsemeyr J. et al. Simulation based analysis and an application to an offshore oil and gas production system of the Natvig measures of component importance in repairable systems // *Reliability Engineering & System Safety*. 2009. Vol. 94. Pp. 1629-1638.
33. Natvig B., Gåsemeyr J. New results on the Barlow-Proschan and Natvig measures of component importance in nonrepairable and repairable systems // *Methodology and Computing in Applied Probability*. 2009. Vol. 11. Pp. 603-620.
34. Natvig B., Huseby A.B., Reistadbakk M. Measures of component importance in repairable multistate systems: a numerical study // *Reliability Engineering & System Safety*. 2011. Vol. 96. Pp. 1680-1690.
35. Ramirez-Marquez J.E., Coit D.W. Composite importance measures for multi-state systems with multistate components // *IEEE Transactions on Reliability*. 2005. Vol. 54. Pp. 517-529.
36. Ramirez-Marquez J.E., Coit D.W. Multi-state component criticality analysis for reliability improvement in multi-state systems // *Reliability Engineering & System Safety*. 2007. Vol. 92. Pp. 1608-1619.
37. Ramirez-Marquez J.E., Rocco C.M., Gebre B.A. et al. New insights on multi-state component criticality and importance // *Reliability Engineering & System Safety*. 2006. Vol. 91. Pp. 894-904.
38. Ross S. Introduction to probability models: 11th ed. San Diego (USA): Academic Press, 2014.
39. Si S., Dui H., Cai Z. et al. The integrated importance measure of multistate coherent systems for maintenance processes // *IEEE Transactions on Reliability*. 2012. Vol. 61(2). Pp. 266-273.
40. Si S., Dui H., Zhao X. et al. Integrated importance measure of component states based on loss of system performance // *IEEE Transactions on Reliability*. 2012. Vol. 61(1). Pp. 192-202.
41. Si S., Levitin G., Dui H. et al. Component state-based integrated importance measure for multi-state systems // *Reliability Engineering & System Safety*. 2013. Vol. 116. Pp. 75-83.
42. Si S., Liu M., Jiang Z. et al. System reliability allocation and optimization based on generalized Birnbaum importance measure // *IEEE Transactions on Reliability*. 2019. Vol. 68(3). Pp. 831-843.
43. Skutlaberg K., Natvig B. Minimization of the expected total net loss in a stationary multistate flow network system // *Applied Mathematics*. 2016. Vol. 7. Pp. 793-817.
44. Todinov M.T. Flow networks. Oxford (UK): Elsevier Insights, 2013.
45. Wu S., Coolen F. A cost-based importance measure for system components: an extension of the Birnbaum importance // *European Journal of Operational Research*. 2013. Vol. 225. Pp. 189-195.
46. Wu S., Chen Y., Wu Q. et al. Linking component importance to optimisation of preventive maintenance policy // *Reliability Engineering & System Safety*. 2016. Vol. 146. Pp. 26-32.
47. Zhu X., Fu Y., Yuan T. et al. Birnbaum importance based heuristics for multi-type component assignment problems // *Reliability Engineering & System Safety*. 2017. Vol. 165. Pp. 209-221.
48. Zio E., Podofillini L. Monte-Carlo simulation analysis of the effects on different system performance levels on the importance on multistate components // *Reliability Engineering & System Safety*. 2003. Vol. 82. Pp. 63-73.
49. Zio E., Podofillini L. Accounting for components interactions in the differential importance measure // *Reliability Engineering & System Safety*. 2006. Vol. 91. Pp. 1163-1174.
50. Zio E., Podofillini L., Levitin G. Estimation of the importance measures of multistate elements by Monte Carlo simulation // *Reliability Engineering & System Safety*. 2004. Vol. 86. Pp. 191-204.
51. Zio E., Marella M., Podofillini L. Importance measures-based prioritization for improving the performance of multi-state systems: Application to the railway industry // *Reliability Engineering & System Safety*. 2007. Vol. 92. Pp. 1303-1314.

References

1. Amrutkar K.P., Kamalja K.K. An overview of various importance measures of reliability system. *International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences* 2017;2(3):150-171.
2. Barlow R.E., Proschan F. Importance of system components and fault tree events. *Stochastic Processes and their Applications* 1975;3:153-173.
3. Birnbaum Z.W. On the importance of different components in a multicomponent system. In: Krishnaia P.R., editor. *Multivariate analysis – II*. New York: Academic Press; 1969. pp. 581-592.
4. Borgonovo E., Apostolakis G.E. A new importance measure for risk-informed decision making. *Reliability Engineering & System Safety* 2001;72:193-212.
5. Cai Z., Si S., Sun S., Li C. Optimization of linear consecutive-k-out-of-n system with a Birnbaum importance-based genetic algorithm. *Reliability Engineering & System Safety* 2016;152:248-258.

6. Cai Z., Si S., Liu Y., Zhao J. Maintenance optimization of continuous state systems based on performance improvement. *IEEE Transactions on Reliability* 2018;67(2):651-665.
7. Chacko V.M. New Joint Importance Measures for Multistate Systems. *International Journal of Statistics and Reliability Engineering* 2020;7(1):140-148.
8. Chacko V.M. On Birnbaum Type Joint Importance Measures for Multistate Reliability Systems. *Communications in Statistics – Theory and Methods* 2021;52(9):2799-2818. doi:10.1080/03610926.2021.1961000.
9. Chacko V.M. On joint importance measures for multistate reliability systems. *Reliability: Theory and Applications* 2021;16:286-293.
10. Chacko V.M. On Joint Importance Measures for Multistate System's Reliability. *Operations Research: Methods, Techniques, and Advancements* 2022;4(65):286-293.
11. Chacko V.M. On new joint importance measures for multistate reliability systems. In: Chapter 7. Computational Intelligence in Sustainable Reliability Engineering. Scrivener Publishing (Wiley); 2022.
12. Chacko V.M. (2022) Birnbaum joint importance measures for repairable multistate systems. *Communications in Statistics – Theory and Methods* (Under Review).
13. Chacko V.M., Manoharan M. Joint importance measures for the multistate system. In: Verma A.K., Kapur P.K., Ghadge S.G., editors. *Advances in Performance and Safety of Complex systems*. New Delhi: Macmillan. Pp. 308-314.
14. Chacko V.M., Manoharan M. Joint Importance measures for multistate reliability system. *Opsearch* 2011;48(3): 257-278.
15. Dinic E.A. Algorithm for solution of a problem of maximum flow in a network with power estimation. *Soviet Mathematics – Doklady* 1970;11:1277-1280.
16. Dui H., Si S., Zuo M.J., Sun S. Semi-Markov process-based integrated importance measures for multi-state systems. *IEEE Transactions on Reliability* 2015;64(2): 754-765.
17. Dui H., Li S., Xing L., Liu H. System performance-based joint importance analysis guided maintenance for repairable systems. *Reliability Engineering & System Safety* 2019;186:162-175.
18. Dui H., Zhang C., Zheng X. Component joint importance measures for maintenances in submarine blowout preventer system. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 2020;63:1-10.
19. Ford L.R., Fulkerson D.R. Maximal flow through a network. *Canadian Journal of Mathematics* 1956;8:399-404.
20. Fussell J.B., Vesely W.E. A new methodology for obtaining cut sets for fault trees. *Transactions of the American Nuclear Society* 1972;15: 262-263.
21. Gρθth W. Multi-state reliability models. *Journal of Applied Probability* 1980;17:735-744.
22. Hosseini S., Barker K., Ramirez-Marquez J.E. A review of definitions and measures of system resilience. *Reliability Engineering & System Safety* 2016;145:47-61.
23. Huseby A.B., Kalinowska K., Abrahamsen T. Birnbaum criticality and importance measures for multistate systems with repairable components. *Probability in the Engineering and Informational Sciences* 2022;36(1):66-86.
24. Huseby A.B., Natvig, B. Advanced discrete simulation methods applied to repairable multi-state systems. In: Bris R., Soares C.G., Martorell S., editors. *Reliability, risk and safety. Theory and applications*, Vol. 1. London: CRC Press; 2010. Pp. 659-666.
25. Huseby A.B., Natvig B. Discrete event simulation methods applied to advanced importance measures of repairable components in multistate network flow systems. *Reliability Engineering & System Safety* 2012;119:186-198.
26. Levitin G., Lisnianski A. Importance and sensitivity analysis of multistate systems using the universal generating function. *Reliability Engineering & System Safety* 1999;65:271-282.
27. Levitin G., Podofillini L., Zio E. Generalised importance measures for multistate elements based on performance level restrictions. *Reliability Engineering & System Safety* 2003;82:287-298.
28. Natvig B. A suggestion for a new measure of importance of system components. *Stochastic Processes and their Applications* 1979;9:319-330.
29. Natvig B. New light on measures of importance of system components. *Scandinavian Journal of Statistics* 1985;12:43-54.
30. Natvig B. Measures of component importance in nonrepairable and repairable multistate strongly coherent systems. *Methodology and Computing in Applied Probability* 2011;13:523-547.
31. Natvig B. Multistate systems reliability theory with applications. New York (USA): John Wiley and Sons, Inc.; 2011.
32. Natvig B., Eide K.A., Gåsemyr J., Huseby A.B., Isaksen S.L. Simulation based analysis and an application to an offshore oil and gas production system of the Natvig measures of component importance in repairable systems. *Reliability Engineering & System Safety* 2009;94: 1629-1638.
33. Natvig B., Gåsemyr J. New results on the Barlow-Proschan and Natvig measures of component importance in nonrepairable and repairable systems. *Methodology and Computing in Applied Probability* 2009;11:603-620.
34. Natvig B., Huseby A.B., Reistadbakk M. Measures of component importance in repairable multistate systems: a numerical study. *Reliability Engineering & System Safety* 2011;96:1680-1690.
35. Ramirez-Marquez J.E., Coit D.W. Composite importance measures for multi-state systems with multistate components. *IEEE Transactions on Reliability* 2005;54: 517-529.
36. Ramirez-Marquez J.E., Coit D.W. Multi-state component criticality analysis for reliability improvement in multi-state systems. *Reliability Engineering & System Safety* 2007;92:1608-1619.
37. Ramirez-Marquez J.E., Rocco C.M., Gebre B.A., Coit D.W., Tortorella M. New insights on multi-state component criticality and importance. *Reliability Engineering & System Safety* 2006;91:894-904.
38. Ross S. Introduction to probability models, 11th ed. San Diego (USA): Academic Press; 2014.

39. Si S., Dui H., Cai Z., Sun S. The integrated importance measure of multistate coherent systems for maintenance processes. *IEEE Transactions on Reliability* 2012;61(2):266-273.
40. Si S., Dui H., Zhao X., Zhang S., Sun S. Integrated importance measure of component states based on loss of system performance. *IEEE Transactions on Reliability* 2012;61(1):192-202.
41. Si S., Levitin G., Dui H., Sun S. Component state-based integrated importance measure for multi-state systems. *Reliability Engineering & System Safety* 2013;116:75-83.
42. Si S., Liu M., Jiang Z., Jin T. System reliability allocation and optimization based on generalized Birnbaum importance measure. *IEEE Transactions on Reliability* 2019;68(3):831-843.
43. Skutlaberg K., Natvig B. Minimization of the expected total net loss in a stationary multistate flow network system. *Applied Mathematics* 2016;7:793-817.
44. Todinov M.T. Flow networks. Oxford (UK): Elsevier Insights; 2013.
45. Wu S., Coolen F. A cost-based importance measure for system components: an extension of the Birnbaum importance. *European Journal of Operational Research* 2013;225:189-195.
46. Wu S., Chen Y., Wu Q., Wang Z. Linking component importance to optimisation of preventive maintenance policy. *Reliability Engineering & System Safety* 2016;146:26-32.
47. Zhu X., Fu Y., Yuan T., Wu X. Birnbaum importance based heuristics for multi-type component assignment problems. *Reliability Engineering & System Safety* 2017;165:209-221.
48. Zio E., Podofillini L. Monte-Carlo simulation analysis of the effects on different system performance levels on the importance on multistate components. *Reliability Engineering & System Safety* 2003;82:63-73.
49. Zio E., Podofillini L. Accounting for components interactions in the differential importance measure. *Reliability Engineering & System Safety* 2006;91:1163-1174.
50. Zio E., Podofillini L., Levitin G. Estimation of the importance measures of multistate elements by Monte Carlo simulation. *Reliability Engineering & System Safety* 2004;86:191-204.
51. Zio E., Marella M., Podofillini L. Importance measures-based prioritization for improving the performance of multi-

state systems: Application to the railway industry. *Reliability Engineering & System Safety* 2007;92:1303-1314.

Сведения об авторах

Чакко В.М. – доцент и декан Департамента статистики колледжа Святого Фомы (автономного), Тиссур, Каликутский университет, Керала, Индия, 680001, e-mail: chackovm@gmail.com.

Франсон Э.С. – научный сотрудник Департамента статистики колледжа Святого Фомы (автономного), Тиссур, Каликутский университет, Керала, Индия, 680001.

Амрута М. – научный сотрудник Департамента статистики колледжа Святого Фомы (автономного), Тиссур, Каликутский университет, Керала, Индия, 680001.

About the authors

Chacko V.M., Associate Professor and Dean, Department of Statistics, St. Thomas College (Autonomous), Thrissur, University of Calicut, Kerala, India-680001, e-mail: chackovm@gmail.com.

Franson Ann Sania, Research Fellow, Department of Statistics, St. Thomas College (Autonomous), Thrissur, University of Calicut, Kerala, India-680001.

Amrutha M., Research Fellow, Department of Statistics, St. Thomas College (Autonomous), Thrissur, University of Calicut, Kerala, India-680001.

Вклад авторов

Чакко В.М. – введение, обоснование критичности мер важности применительно к системе со множеством состояний; рецензирование статьи после обсуждения;

Франсон Э.С. – меры важности для двух компонентов системы со множеством состояний и их идея; рецензирование статьи после обсуждения;

Амрута М. – меры важности для трех компонентов системы со множеством состояний, иллюстрация и заключение; рецензирование статьи после обсуждения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Оценка эксплуатационной надежности импульсного исследовательского реактора

Evaluating the operational dependability of a pulse research reactor

Бойкова Т.В.^{1*}, Кочнов Ю.О.¹, Петрунин Н.В.¹, Тутнов И.А.¹

Boykova T.V.^{1*}, Kochnov Yu.O.¹, Petrunin N.V.¹, Tutnov I.A.¹

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Российская Федерация

¹National Research Centre Kurchatov Institute, Moscow, Russian Federation

*Boykova_TV@nrcki.ru



Бойкова Т.В.



Кочнов Ю.О.



Петрунин Н.В.



Тутнов И.А.

Резюме. Цель. Для обоснования безопасности дальнейшего функционирования исследовательского ядерного импульсного растворного реактора ИИН-1 за пределами проектного ресурса выполнена оценка его надежности для будущего периода эксплуатации. **Цель статьи** – описание критериев и примера оценки надежности корпуса ИИН-1. **Метод.** На этапе проектирования ИИН-1 критерии его надежности не были определены, поэтому на основе общих норм безопасности исследовательских ядерных реакторов НП-009-17 был выбран оригинальный критерий надежности – герметичность корпуса. Корпус реактора, который в период эксплуатации подвергается циклическим термомеханической и радиационной нагрузкам в момент импульса делений ядерного топлива, коррозионным повреждениям при нагревании раствора, динамическому воздействию химического микровзрыва гремучей смеси в период физического эксперимента, является опасным конструктивным элементом ИИН-1, наиболее нагруженным в части противоаварийной устойчивости и приоритетно определяет общую ядерную и радиационную безопасность данной исследовательской установки. Герметичность корпуса ИИН-1 и его надежность в целом определяют эффективность его барьеров безопасности для окружающего мира и персонала на длительном этапе эксплуатации исследовательской установки. Для оценки надежности корпуса ИИН-1 применяются экспериментальные методы неразрушающих испытаний для контроля его герметичности и состояния металла под действием агрессивной среды, такие как металлографические исследования образцов-свидетелей, механические испытания и пр. Определение прочностных и пластических свойств металла корпуса проводилось методом статического растяжения. **Результаты.** Определены временное сопротивление, предел текучести, ударная вязкость и относительное удлинение материала корпуса в условиях временной деградации его служебных свойств в период эксплуатационного старения. По результатам испытаний образцов составлены таблицы и сделаны выводы о противоаварийной устойчивости корпуса реактора для будущего периода эксплуатации ИИН-1. Металлографические исследования на склонность к межкристаллитной коррозии проводились по методу АМ ГОСТ 6032-58. Определены основные факторы, влияющие на старение материала корпуса импульсного реактора: поток быстрых нейтронов и их интегральных значений на наиболее уязвимых элементах корпуса реактора и образование гремучей смеси (состоящей из водорода и кислорода), которая носит взрывной характер, приводит к мгновенному вскипанию топлива, и, как следствие, к значительным циклическим напряжениям в материале корпуса, которые способны вызывать остаточные деформации. В итоге нарушить герметичность корпуса и разрушить реактор. Для оценки надежности корпуса данного реактора периодически проводится эксплуатационный контроль деградации свойств его металла, в т.ч. на коррозионную стойкость и механическую прочность путем исследования образцов-свидетелей. В статье приводится описание образцов-свидетелей и процедуры их исследований. **Заключение.** Предлагаемый в статье подход позволяет выполнять прогнозную оценку эксплуатационной надежности растворного ядерного реактора при его длительной эксплуатации. Предложены основные критерии для оценки характеристик состояния безопасности и надежности корпуса, на основании которых возможно уточнить ресурс безопасности исследовательского ядерного реактора и верифицировать возможность продления его проектного срока эксплуатации.

Abstract. Aim. For the purpose of substantiating the safety of further operation of the IIN-1 pulsed solution research reactor beyond the design service life, its dependability has been evaluated for the future operation period. The paper aims to describe the criteria and show an example of IIN-1 vessel dependability evaluation. **Method.** At the stage of IIN-1 design, no dependability criteria were defined, therefore, based on the NP-009-17 general norms of research nuclear reactor safety, an original dependability criterion, the vessel seal, has been

chosen. A reactor vessel that, over the period of operation, is subject to cyclic thermomechanical and radiation loads at the moments of nuclear fuel fission pulse, corrosion damage at the moments of solution heating, dynamic forces of chemical microexplosion of the explosive mix during physical experiments, is a hazardous structural element of IIN-1 that is exposed to the highest loads in terms of emergency tolerance and a priority contributor to the overall nuclear and radiation safety of the research installation. The IIN-1 vessel seal and its general dependability define the efficiency of its safety barriers for the environment and personnel over the long operation of the research installation. IIN-1 vessel dependability is evaluated using experimental methods of non-destructive testing aimed at verifying the seal and state of the metal exposed to corroding media, such as metallographical observation of surveillance specimens, mechanical testing, etc. The strength and plastic properties of the vessel's metal were tested by static tension. **Results.** The ultimate stress limit, yield strength, impact resistance and percent elongation of the vessel's material under temporal degradation of its service properties in the course of life ageing have been defined. Based on the results of specimen tests, tables have been drawn up and conclusions have been made regarding the emergency tolerance of the reactor vessel for the future operation period of IIN-1. Metallographic research in terms of the tendency to intercrystalline corrosion were conducted using the AM method according to GOST 6032-58. The key factors have been defined that affect the ageing of the vessel material of a pulsed reactor: fast neutron flux and their integral values in the reactor vessel's most vulnerable elements and formation of explosive mix (consisting of hydrogen and oxygen) that causes immediate boiling of the fuel and, subsequently, significant cyclic stress in the vessel's material that can cause permanent deformation. They can eventually disrupt the vessel seal and destroy the reactor. The dependability of the vessel of such nuclear reactor is evaluated through recurrent in-service inspections of the degradation of the metal's properties, including in terms of corrosion resistance and mechanical strength by examining surveillance specimens. The paper describes the surveillance specimens and the procedure of their examination. **Conclusion.** The approach suggested in the paper enables predictive assessment of the operational dependability of a solution nuclear reactor in the course of a long operation. The authors suggest key criteria for evaluating the characteristics of a vessel's safety and dependability state that allow accurately defining the safe life of a research nuclear reactor and verifying the extendibility of its design life.

Ключевые слова: надежность, эксплуатационный контроль, импульсный реактор «Гидра», уранил сульфат, образцы-свидетели, межкристаллитная коррозия, металлографические исследования, коррозионная стойкость, оценка надежности.

Keywords: dependability, in-service inspection, Gidra pulse reactor, uranyl sulphate, surveillance specimens, grain-boundary attack, metallographical observations, corrosion resistance, dependability evaluation.

Для цитирования: Бойкова Т.В., Кочнов Ю.О., Петрунин Н.В., Тутнов И.А. Оценка эксплуатационной надежности импульсного исследовательского реактора // Надежность. 2023. №3. С. 14-22. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-3-14-22>

For citation: Boykova T.V., Kochnov Yu.O., Petrunin N.V., Tutnov I.A. Evaluating the operational dependability of a pulse research reactor. Dependability 2023;3:14-22. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-3-14-22>

Поступила: 11.04.2023 / **После доработки:** 04.07.2023 / **К печати:** 15.09.2023

Received on: 11.04.2023 / **Revised on:** 04.07.2023 / **For printing:** 15.09.2023

Введение

С начала 1950-х годов в различных областях науки и техники в качестве мощных источников гамма- и нейтронного излучений используются исследовательские ядерные реакторы, обеспечивающие многократное получение контролируемых мощных импульсов делений тяжелых атомных ядер. Такие реакторы получили название импульсных.

Импульсные растворные реакторы используются как интенсивные источники нейтронов в научных областях техники и медицины, в первую очередь, для выполнения необходимых исследований различных

короткоживущих радиоактивных процессов, изучения эффектов радиационных повреждений и пр. Высокая чувствительность радиационного активационного анализа и точность, отсутствие необходимости в разрушении образца, а также быстрота исследовательского процесса перспективны для научных и иных исследований в геологоразведочной практике, металлургии, химической и нефтяной отраслях промышленности, на обогащательных горнорудных предприятиях и в промышленности редких и сверхчистых материалов. Импульсный режим работы реактора для активационного анализа имеет преимущества для моделирования влияния радиации на материалы,

электронные приборы и биологические объекты по сравнению с режимом стационарным [1].

Парк импульсных исследовательских ядерных реакторов (ИИР) сосредоточен, главным образом, в США, России и ряде других стран. При этом объем публикаций о конструкции, физических характеристиках, особенностях управления, безопасности, тематике проводимых исследований результатах работ ИИР достаточно ограничен [2]. В России весной 1965 года были введены в эксплуатацию два импульсных растворных реактора: реактор ВИР-1 во ВНИИЭФ (г. Саров) и реактор ИИН-1 в Институте атомной энергии (г. Москва). Данные типы импульсных реакторов имеют ряд уникальных служебных свойств: хорошо удовлетворяют требованиям исследователей к активационному анализу; относительно просты и по физике реактора, и по конструкции, поэтому их было возможно создать и ввести в эксплуатацию быстрее, чем реакторы других типов; они безопасны и надежны в эксплуатации. Данные исследовательские установки актуальны для современных научных работ в текущий момент и имеют устойчивую перспективу для их практического применения в будущем. Поэтому важна задача продления эксплуатации реактора ИИН-1 за пределы проектного ресурса с соблюдением всех действующих норм по ядерной, радиационной и промышленной безопасности.

Постановка задачи

Процедура продления проектного ресурса для объектов использования атомной энергии требует представления верификационных обоснований ее надежности в аспектах противоаварийной устойчивости и безопасности. К текущему моменту пока нет полноты нормативных рекомендаций и инструментов для выполнения практических работ по обоснованию возможности продления проектного ресурса для ИИР. Поэтому в нашем случае для определения фактического ресурса ИИН-1 было необходимо предложить метод и выполнить оценку эксплуатационной надежности импульсного исследовательского реактора при длительном периоде эксплуатации, и дополнительно с учетом рекомендаций работы [3], норм и правил ядерной безопасности исследовательских ядерных реакторов (НП-009-17, НП-048-03) сформулировать свод критериев эксплуатационной надежности ИИН-1 в формате предлагаемого метода.

Оценка эксплуатационной надежности импульсного исследовательского реактора

Для формирования метода и выполнения оценки эксплуатационной надежности ИИР при длительном периоде эксплуатации первоначально необходимо уточнить, какие характеристики состояния ИИН-1 определяют его надежность, сформулировать понятийное определение эксплуатационной надежности ИИР.

ГОСТ Р 27.102-2021 «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения» определяет надежность, как свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в заданных режимах, условиях применения, и т.д. Тогда в нашем случае эксплуатационная надежность ИИР – свойство ИИР сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах эксплуатации и условиях применения, технического обслуживания, ремонта и пр. Для ИИР основная функция – ядерная безопасность (НП-009-17, НП-048-03). Она обеспечивается выполнением норм и правил безопасности, требований проекта ИИР, культурой безопасности, качеством и полнотой экспериментальных исследований нейтронно-физических характеристик при физическом и энергетическом пусках ИИР, системой организационно-технических мероприятий, уменьшающих вероятность проявления опасных событий, в т.ч. из-за ошибок персонала и отказов оборудования при эксплуатации ИИР в периоды работы реактора в режиме пуска, на мощности и в других режимах. Таким образом, в нашем случае под термином эксплуатационная надежность ИИН-1 следует понимать безопасность, т.е. такое состояние этого реактора на любом моменте его жизненного цикла, когда за установленными барьерами нет опасности для персонала, окружающего мира в аспектах проявления ядерной, радиационной, иной техногенной аварии или инцидента. Корпус растворного импульсного реактора является основным барьером безопасности. Он, в общем и целом, определяет безопасность и надежность ИИН-1 и представляет собой сварной баллон, который заполнен раствором уранил-сульфата, который характеризуется хорошей химической стабильностью. Объем раствора обеспечивает возможность создания мощного импульса нейтронов длительностью в несколько миллисекунд. Генерирование импульса производится путем быстрого вывода из зоны поглощающего стержня. Самогашение ядерной цепной реакции в реакторе происходит в результате термического и пустотного расширения активной зоны связанных с образованием в растворе пузырьков газа. Создаваемые в реакторе импульсы позволяют решать задачи научных экспериментов: длительность 1-2 миллисекунды, спектр нейтронов, близкий к спектру нейтронов реакции деления, а интегральный поток нейтронов (флюенс) – 10^{15} нейтрон/см².

Метод оценки эксплуатационной надежности импульсного исследовательского реактора при длительным периоде эксплуатации

Этот метод состоит из совокупности взаимосвязанных действий, в результате которых прогнозируется вре-

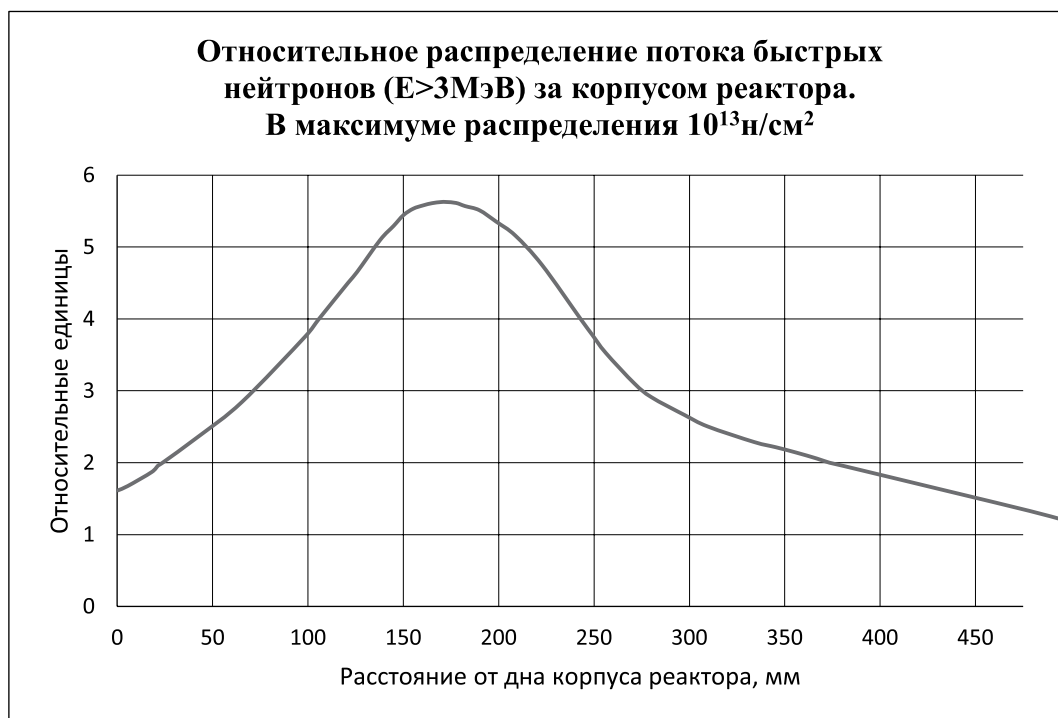


Рис. 1. Кривая распределения потока быстрых нейтронов

ма наступления возможного события – разгерметизация и разрушение (появление течи раствора, образования сквозных коррозионных повреждений или усталостных трещин, разрыв) корпуса. Основные действия и процедуры метода: исследование физико-механических свойств материала корпуса способами неразрушающих испытаний; сбор и систематизация данных об истории термомеханических, радиационных и иных силовых нагрузок на материал корпуса, условий эксплуатации, включая сведения о профилактических и восстановительных ремонтах на реакторе; прочностной расчет напряженно-деформированного состояния корпуса для разных этапов эксплуатации с выявленными в процессе эксплуатации методами неразрушающего контроля дефектами; прогнозирование физико-технологической долговечности корпуса реактора, определение остаточного безопасного ресурса корпуса по критериям механики и физики разрушения материалов при их радиационном, коррозионном и усталостном повреждении; верификация результатов инструментальных исследований и расчетов.

Исследование материала корпуса ИИН-1

В прошлые годы при проектировании корпуса ИИР не принималось во внимание изменение физико-химических свойств материала силового корпуса под действием реакторного излучения из-за априорного предположения – незначительный интегральный эффект в течение топливной кампании ядерного реактора. Совокупное воздействие на материалы корпуса и исследовательских каналов, которые работают в условиях агрессивной сре-

ды, радиационного облучения и импульсных нагрузок, и влияние такого воздействия на надежность реактора на тот момент было мало изучено. Отсутствие методов и приборов контроля неразрушающими методами качества реакторных узлов, высокой радиационной активности вблизи реактора по факту не позволял в рамках профилактических ремонтных работ выявлять и изучать возможное развитие опасных дефектов в конструкциях реактора. Поэтому для проведения исследований возможной опасности из-за воздействия термомеханической нагрузки, влияния нейтронного излучения и агрессивной коррозионной среды других негативных факторов воздействия на техническое состояние реактора, его противоаварийную устойчивость и безопасность и определения показателей критериев надежности корпуса для новых проектов ИИР, корпус ИИН-1 был демонтирован и исследован.

ИИН-1 находился в эксплуатации с апреля 1965 года по май 1970. За время работы было произведено около 300 импульсов, при среднем энерговыделении 7 МДж/импульс. Импульсное давление при вспышке не превышало $50\text{--}70 \text{ кгс/см}^2$, которое создавало кольцевое напряжение в стенке корпуса реактора около $5,9 \text{ кг/мм}^2$. Разогрев топливного раствора во время импульса – не более 100°C .

Относительное распределение потоков нейтронов по высоте за корпусом реактора показано на рис. 1.

После двухгодичной выдержки корпуса реактора фактический уровень уменьшения наведенной активности материала уже позволил приступить к работам по его вскрытию и резки заготовок для изготовления исследуемых образцов (рис. 2).

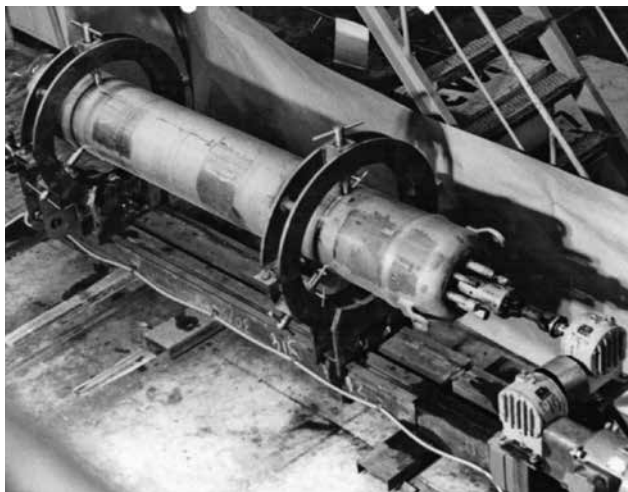


Рис. 2. Общий вид станка для вскрытия и резки корпуса ИИН-1

Программа и методика исследования ИИН-1, помимо тщательного визуального осмотра внутренней поверхности обечайки корпуса (после вскрытия) включала в себя металлографические исследования, в т.ч. для выявления очагов межкристаллитной коррозии, и механические испытания материалов корпуса и исследовательских каналов. После вскрытия корпуса реактора ИИН-1 был проведен визуальный осмотр внутренней поверхности «защитной» обечайки и наружной поверхности труба-



Рис. 3. Полость реактора после отрезки дна (видна граница уровня раствора)

тых каналов из коррозионностойкой стали 0X18H10T: в зоне постоянного нахождения раствора; в зоне уровня (ватерлинии) раствора; в зоне над поверхностью раствора, смачиваемой агрессивной средой во время импульса мощности. Осмотр показал, что поверхность материала чистая и визуально не отличается от исходного состояния, но имеется отличие в отражательной способности поверхности материала, находившегося в растворе, от поверхности над раствором. Видна граница уровня раствора (рис. 3).

Следов коррозии на всех участках поверхности корпуса не было обнаружено. Основные геометрические размеры деталей активной зоны реактора не изменились и находятся в пределах технологических допусков на изготовление корпуса. На поверхности дна обечайки корпуса обнаружен тонкий слой пастообразной массы серого цвета, легко удаляемый с поверхности. Данный осадок являлся результатом смыва раствором в процессе эксплуатации остатков шлака из корней сварных швов.

Экспериментальные исследования и их результаты

Определение прочностных и пластических свойств металла силовой части корпуса проводилось методом статического растяжения на малых гагаринских образцах (диаметр рабочей части 3 мм, длина – 15 мм). Испытания на ударную вязкость проводились на образцах типа I по ГОСТ 9454-60. Все образцы делались из материала корпуса реактора ИИН-1 из разных контрольных проб. Испытания проводились при температуре 20°C. Характеристики механических свойств, полученные при испытании, сравнивались с паспортными данными на готовое изделие – корпус ИИН-1.

Результаты механических испытаний образцов, представленные в табл. 1, 2 и 3, показали, что основные характеристики корпусного металла (временное сопротивление, предел текучести, ударная вязкость и относительное удлинение) практически не изменились и находятся в допустимых пределах в соответствии с техническими требованиями на изготовление. Таким образом, для указанных условий работы в материалах корпусных конструкций и центрального канала не наблюдается фактов радиационного упрочнения и охрупчивания. Учитывая, что в материале корпуса реактора заложен весьма низкий уровень проектного напряжения-растяжения ($5,9 \text{ кг/мм}^2$ по сравнению с $\sigma_{0,2} = 56 \text{ кг/мм}^2$), исключая возможность возникновения хрупкого разрушения корпуса, а также очень малую величину интегральной дозы облучения быстрыми нейтронами перлитной стали 20ХМ, ресурс работы корпуса реактора, с точки зрения механической прочности, практически неограничен.

Механические испытания показали, что временное сопротивление, предел текучести, ударная вязкость и относительное удлинение практически не изменились и находятся в допустимых пределах. Металлографические

Табл. 1. Результаты испытаний на растяжение и ударную вязкость образцов, вырезанных из основного металла силовой корпуса (сталь 20ХМ)

Механические свойства по паспорту				Механические свойства при испытании			
σ_B , кг/см ²	$\sigma_{0,2}$, кг/см ²	δ , %	α_K , Дж/см ²	σ_B , кг/см ²	$\sigma_{0,2}$, кг/см ²	δ , %	α_K , Дж/см ²
72,5÷77,5	60,5÷63,0	16÷18	148÷150	69÷72	58÷61	17÷22	140÷160

Табл. 2. Результаты испытаний на растяжение и ударную вязкость образцов, вырезанных из металла шва силовой части корпуса.

Механические свойства по паспорту				Механические свойства при испытании			
σ_B , кг/см ²	$\sigma_{0,2}$, кг/см ²	δ , %	α_K , Дж/см ²	σ_B , кг/см ²	$\sigma_{0,2}$, кг/см ²	δ , %	α_K , Дж/см ²
60÷67	-	-	120÷140	56÷62	31÷34	42÷53	130÷150

Табл. 3. Результаты испытаний на растяжение материала наконечника центрального канала корпуса (Д16Т).

Механические свойства по паспорту				Механические свойства при испытании			
σ_B , кг/см ²	$\sigma_{0,2}$, кг/см ²	δ , %	α_K , Дж/см ²	σ_B , кг/см ²	$\sigma_{0,2}$, кг/см ²	δ , %	α_K , Дж/см ²
45	30	11	—	44,5÷45,1	28,5÷30,5	9,3÷11,2	—

исследования включали анализ состояния внутренней рабочей поверхности обечайки корпуса, центрального канала из стали 0Х18Н10Т и поверхности основного металла силовой части корпуса из стали 20ХМ и их сварных швов. Металлографические исследования металла образцов из обечайки корпуса и центрального канала не выявили на рабочей поверхности каких-либо дефектов коррозионного характера.

При исследовании сварных соединений обечайки корпуса на двух из 10 образцах обнаружены незначительные поверхностные дефекты глубиной до 100 мкм, что соответствует средней скорости местной коррозии 0,02 мм/год. Такая скорость коррозии говорит о хорошей коррозионной стойкости сварных швов обечайки корпуса. Металлографические исследования поверхности металла силовой части корпуса (сталь 20ХМ) и его сварного шва в зоне установки рубашки охлаждения обнаружили местное поверхностное эрозионное повреждение (раз-

едание) стали на глубину 35 мкм, что свидетельствует о вполне удовлетворительной стойкости металла силового корпуса в зоне охлаждения водой.

Испытаниям на склонность к межкристаллитной коррозии (МКК) проводились по методу АМ ГОСТ 6032-58 путем кипячения в сернокислом растворе медного купороса в присутствии медной стружки в течение 24 часов. Состав раствора: $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} + 1000 \text{ мл}^3 \text{H}_2\text{SO}_4$ (Плотность 1,835 г/см³) + медная стружка. По окончании кипячения образцы извлекались и загибались на угол 90° с последующим просмотром места изгиба на наличие трещин. Ни после изгиба образцов на угол 90°, ни после дополнительного металлографического исследования наличие трещин на рабочих поверхностях не обнаружено (рис. 4), что свидетельствует об отсутствии склонности к межкристаллитной коррозии.

Применение методик на действующем реакторе «Гидра»

С учетом проведенных исследований в 1971 году в Институте атомной энергии был введен в эксплуатацию импульсный растворный реактор второго поколения ИИР «Гидра», который может эксплуатироваться в импульсном режиме или на стационарной мощности. В качестве корпуса реактора (рис. 5) был использован с небольшими доработками серийный баллон высокого давления, выполненный из высокопрочной коррозионностойкой стали, паспортные данные которого удовлетворяли предъявляемым проектным требованиям. Через крышку корпуса проходят пять вертикальных трубок: центральный экспериментальный канал и четыре канала контроля, в которых размещаются поглощающие органы. Качество изготовления корпуса контролировалось не только обычными испытаниями



Рис. 4. Структура приповерхностного слоя контролируемой поверхности сварного образца, вырезанного из корпуса реактора, в месте перехода от основного металла к сварному шву

на механическую прочность и герметичность, но осуществлялся также ультразвуковой, рентгеновский и гамма-контроль [4].

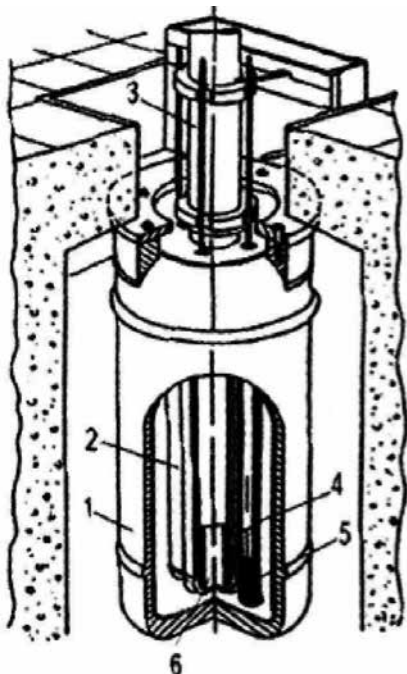


Рис. 5. Схема реактора «Гидра» в разрезе: 1 – корпус реактора; 2 – каналы регулирующих стержней; 3 – пневмопривод пускового устройства; 4 – пусковой стержень; 5 – регулирующие стержни; 6 – центральный исследовательский канал

Предэксплуатационный контроль состояния основного металла и сварных соединений корпуса реактора проводился для получения данных фактического состояния основного металла и сварных соединений после окончания этапов, предшествующих вводу в эксплуатацию и явился основанием для принятия решения о готовности ИИР к дальнейшей эксплуатации. В связи с особенностями работы ИИР в импульсном режиме корпус реактора испытывает импульсные нагрузки, обусловленные инерционным давлением, и коррозионное воздействие от топливного раствора. Поэтому до ввода в эксплуатацию были проведены комплексные испытания корпуса со связанными с ним системами на герметичность. В связи с тем, что корпус при эксплуатации становится недоступным для осмотра по конструктивным особенностям ИИР и проведения испытаний на герметичность с учетом условий радиационной обстановки, эксплуатационный контроль основного металла и сварных соединений корпуса проводится на основании ежедневного контроля изменения его размеров (разряжения) в свободном над раствором объеме с помощью штатных приборов. Для оценки надежности корпусов растворных реакторов проводится эксплуатационный контроль металла корпусов на коррозионную стойкость и механическую прочность путем исследования образцов-свидетелей из стали марки 08X18H10T. В связи с невозможностью установки образцов-свидетелей на реакторе «Гидра» они были

установлены в более жестких условиях на стационарном растворном реакторе «Аргус». Характеристики условий на реакторах представлены в табл. 4.

Табл. 4. Характеристика условий эксплуатации реакторов

ИЯУ	Набранный флюенс с начала эксплуатации реактора, нейтрон/см ²
ИИР «Гидра»	$1,2 \cdot 10^{17}$
ИР «Аргус»	$3,1 \cdot 10^{18}$

Образцы-свидетели установлены в трех специальных обоймах (рис. 6), закреплены в единый блок на вертикальном штоке при помощи резьбовых соединений и установлены на растворном реакторе «Аргус». В нижнюю обойму блока (обойма 3), расположенную в растворе, устанавливали 12 образцов, вырезанных из стыкового шва и дна корпуса. В среднюю обойму (обойма 2), расположенную на границе между раствором и зоной паровоздушной смеси (на ватерлинии), и в верхнюю обойму (обойма 1), расположенную целиком в зоне паровоздушной смеси, устанавливали по 12 образцов, вырезанных из обечайки корпуса.



Рис. 6. Обоймы с образцами-свидетелями

При проверке из каждой обоймы изымаются по 3 образца. Интервал энерговыделения между испытаниями образцов-свидетелей должен составлять

($5 \dots 10$) $\cdot 10^5$ кВт·час. При испытаниях образцов-свидетелей проводится: визуальный осмотр; замеры по толщине; испытания на межкристаллитную коррозию (по ГОСТ 6032–2017 методом АМУ без провоцирующего разогрева); металлографические исследования.

Учитывая факт, что радиационное повреждение стали может быть заметным при флюенсах быстрых нейтронов, начиная со значения 10^{19} нейтр./см², при которых материал корпуса – сталь – подвержена радиационному набуханию и радиационной ползучести, проводится периодический расчет флюенса с помощью аттестованной программы MCU-RFFI/A для ЭВМ [4, 5]. Также по аттестованной программе для ЭВМ «Ресурс-КМ» был выполнен расчет напряженно-деформированного состояния корпуса реактора и установлено, что интенсивность действующих механических напряжений и уровень возможных деформаций для всего жизненного проектного цикла функционирования реактора не оказывают существенного влияния на его надежность. Фактически прогнозируемые механические напряжения корпуса реактора не являются критическими для надежности и безопасности будущего функционирования ИИР с точки зрения снижения его противоаварийной устойчивости. В то же время значимым фактором для эксплуатационной надежности ИИР является коррозия. В этой связи периодическая диагностика коррозионных повреждений корпусных деталей ИИР и количественное определение параметров эрозионно-коррозионного повреждения корпуса становятся важным и значимым параметром для общей эксплуатационной надежности данной исследовательской ядерной установки.

Заключение

На основании данных выполненных исследований были предложены следующие критерии оценки надежности корпуса импульсного растворного реактора. Первым критерием является соответствие результатов расчетных исследований долговечности, прочности, плотности потока быстрых нейтронов и их интегральных значений на наиболее уязвимых элементах корпуса реактора в зависимости от характера работы реактора (мощности и времени работы) требований норм и правил по ядерной и радиационной безопасности. Эксплуатационная надежность ИИР подтверждается на основании результата расчета набранного флюенса нейтронов, прочностного расчета и испытания образцов-свидетелей. Вторым критерий – верификационное обоснование надежности ИИР путем диагностического прогнозирования возможного момента нарушения герметичности корпуса ИИР-1 за счет деградационного повреждения материала корпуса реактора в период его длительной эксплуатации. Герметичность корпуса ИИР диагностируется в аспектах выявления возможной утечки раствора, допустимости выявленных методами неразрушающих испытаний дефектов (поверхностных трещин, микропор, очагов коррозии). При работе ИИР

происходит радиолиз воды, входящей в топливный раствор. Основным продуктом радиолиза – гремучий газ, стехиометрическая смесь водорода и кислорода ($2\text{H}_2 + \text{O}_2$). При импульсах с большим энерговыделением ~ 40 МДж (и больше) выделение гремучих газов носит взрывной характер, что приводит к разлету топливного раствора, его удару по корпусу и значительным кратковременным динамическим механическим напряжениям в материале корпуса, способным вызвать остаточные деформации, развитие и рост дефектов, трещин.

Таким образом, сказанное выше демонстрирует перспективный метод оценки эксплуатационной надежности для исследовательских импульсных ядерных реакторов.

Библиографический список

1. Бать Г.А., Коченов А.С., Кабанов Л.П. Исследовательские ядерные реакторы. М: Атомиздат, 1972. 272 с.
2. Павшук В.А., Талызин В.М. и др. Обзор результатов исследований импульсного реактора ИГР // Известия Челябинского научного центра. 2004. Вып. 1(22). С. 37-61.
3. Ершов Г.А., Семериков В.Н., Семериков Н.В. О системе стандартов «Надежность в технике» // Стандарты и качество. 2018. № 8. С. 14-19.
4. Высокотемпературная ядерная энергетика. Уникальные разработки и экспериментальная база Курчатова института / Под общ. ред. акад. РАН Н.Н. Пономарева-Степного. М.: ИздАТ, 2008. 184 с.
5. Бойкова Т.В., Кочнов Ю.О., Мясников С.В. и др. Эксплуатационный контроль состояния металла корпусов растворных реакторов в НИЦ «Курчатовский институт» // Вопросы материаловедения. 2022. № 4(112). С. 191-198.
6. Колесов В.Ф. Аперiodические импульсные реакторы: монография: в 2 томах. Саров: Изд-во РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2007. Т. 1: 552 с. Т. 2: 556 с.

References

1. Bat G.A., Kochenov A.S., Kabanov L.P. [Research nuclear reactors]. Moscow: Atomizdat; 1972. (in Russ.)
2. Pavshuk V.A., Talyzin V.M. et al. A review of the results of the IGR pulse reactor research. *Proceedings of the Chelyabinsk Scientific Center* 2004;1(22):37-61. (in Russ.)
3. Yershov G.A., Semerikov V.N., Semerikov N.V. On the Dependability in engineering system of standards. *Standarty i kachestvo* 2018;8:14-19. (in Russ.)
4. Ponomarev-Stepnoy N.N., editor. [High-temperature nuclear energy. Unique developments and experimental facilities of the Kurchatov Institute]. Moscow: IzdAT; 2008.
5. Boykova T.V., Kochnov Yu.O., Miasnikov S.V. et al. [In-service inspection of the state of the metals of solution reactor vessels in the Kurchatov Institute]. *Voprosy Materialovedeniya* 2022;4(112):191-198. (in Russ.)
6. Kolesov V.F. [Aperiodic pulsed reactors: a monograph in 2 volumes. Volume 1]. Sarov: Izd-vo RFIA-Ts-VNIIEF; 2007.

Сведения об авторах

Бойкова Татьяна Владимировна – начальник лаборатории физических исследований НИЦ «Курчатовский институт», пл. Академика Курчатова д. 1, Москва, Российская Федерация, 123182, e-mail: Boykova_TV@nrcki.ru

Кочнов Юрий Олегович – ведущий инженер комплекса растворных реакторов НИЦ «Курчатовский институт», пл. Академика Курчатова д. 1, Москва, Российская Федерация, 123182, e-mail: Kochnov_YO@nrcki.ru

Петрунин Николай Васильевич – начальник комплекса растворных реакторов НИЦ «Курчатовский институт», пл. Академика Курчатова д. 1, Москва, Российская Федерация, 123182, e-mail: Petrunin_NV@nrcki.ru

Тутнов Игорь Александрович – доктор технических наук; профессор, начальник лаборатории исследования старения и продления ресурса ЯЭУ НИЦ «Курчатовский институт», пл. Академика Курчатова д. 1, Москва, Российская Федерация, 123182, e-mail: Tutnov_IA@nrcki.ru

About the authors

Tatiana V. Boykova, Head of Laboratory for physical research, Kurchatov Institute, 1 Akademika Kurchatova sq., Moscow, 123182, Russian Federation, e-mail: Boykova_TV@nrcki.ru.

Yuri O. Kochnov, Lead Engineer, Solution Reactor Facilities, Kurchatov Institute, 1 Akademika Kurchatova sq., Moscow, 123182, Russian Federation, e-mail: Kochnov_YO@nrcki.ru.

Nikolay V. Petrunin, Head of Solution Reactor Facilities, Kurchatov Institute, 1 Akademika Kurchatova sq., Moscow, 123182, Russian Federation, e-mail: Petrunin_NV@nrcki.ru.

Igor A. Tutnov, Doctor of Engineering; Professor, Head of Laboratory for NPP Ageing and Lifetime Extension, Kurchatov Institute, 1 Akademika Kurchatova sq., Moscow, 123182, Russian Federation, e-mail: Tutnov_IA@nrcki.ru.

Вклад авторов

Бойкова Т.В., Кочнов Ю.О. провели анализ литературных источников и известных методик. Систематизировали доступные знания о реакторах «Гидра» и др.

Тутнов И.А. оформил целостность статьи. Сформировал критерии прочности корпуса

Петрунин Н.В. разработал методику определения оценки состояния корпуса по образцам-свидетелям применительно к данным видам реакторов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Пересмотр роли испытаний при нерегулярном нагружении при получении научных выводов о пределе выносливости¹

Reconsidering the Role of Fatigue Irregular Testing in Scientific Conclusions About the Fatigue Limit

Гадолина И.В.
Gadolina I.V.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), Москва, Российская Федерация
Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (IMASH RAN), Moscow, Russian Federation
gadolina@mail.ru



Гадолина И.В.

Резюме. Цель. Мы предлагаем метод использования испытания на усталость при нерегулярной нагрузке для изучения ключевых тем усталости материалов, а именно, касающихся предела усталости. Характеристики предел усталости важно знать: для ускорения испытаний; для обеспечения стабильного и надежного обслуживания машиностроительных изделий. **Методы.** Сравнительные исследования при блочных и случайных нагрузках предоставляют возможность исследователям делать соответствующие выводы без чрезмерного увеличения времени испытаний и без использования испытаний при сверхзвуковых частотах, которые в некоторой степени противоречивы. Мы приводим пример применения предложенного метода. Вторая стадия усталости, а именно стадия распространения трещины, также рассматривается. Основная идея аналогична – испытания при нерегулярной нагрузке дают возможность судить о максимуме среди малых амплитуд, которые не являются повреждающими. **Выводы.** Предложенный метод позволяет с использованием специальных видов испытаний получить ценную для инженеров и исследователей информацию, при этом испытания являются более приближенными к реальным условиям эксплуатации машин.

Abstract. Aim. We suggest a method of using the fatigue test in case of irregular loading for studying the key subject matters related to material fatigue, specifically those to do with fatigue limit. It is important to know the fatigue limit characteristic in order to speed up tests; in order to ensure stable and reliable servicing of machines. **Methods.** Comparative examinations in cases of block and random loadings enable researchers to make corresponding conclusions without excessively extending the duration of tests and without recurring to supersonic frequency tests that are to a certain degree controversial. An example of applying the proposed method is given. The second stage of fatigue, specifically the crack propagation stage, is also considered. The key idea is similar. Testing under irregular loading allows making conclusions regarding the maximum among small amplitudes that do not cause damage. **Conclusions.** The proposed method allows using special testing methods to obtain information that is valuable to engineers and researchers. The tests are also closer to the field conditions of machinery operation.

Ключевые слова: Механическая усталость, предел выносливости, блочная нагрузка, суммирование линейных повреждений, статистика.

Keywords: mechanical fatigue, durability limit, block loading, addition of linear damage, statistics.

Для цитирования: Гадолина И.В. Пересмотр роли испытаний при нерегулярном нагружении при получении научных выводов о пределе выносливости // Надежность. 2023. №3. С. 23-27. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-3-23-27>

For citation: Gadolina I.V. Reconsidering the Role of Fatigue Irregular Testing in Scientific Conclusions About the Fatigue Limit. Dependability 2023;3: 23-27. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-3-23-27>

Поступила: 29.03.2023 / **После доработки:** 06.07.2023 / **К печати:** 15.09.2023

Received on: 29.03.2023 / **Revised on:** 06.07.2023 / **For printing:** 15.09.2023

¹ Gadolina, I.V. Reconsidering the Role of Fatigue Irregular Testing in Scientific Conclusions About the Fatigue Limit. Journal of Graphic Era University, Vol. 10 1, 41–50. DOI: <https://doi.org/10.13052/jgeu0975-1416.1014>

Введение

Исторически явление усталости (первоначально в металлах, а последние годы и в композитах) изучалось, когда образцы нагружались по синусоиде. Типичным примером регулярной нагрузки является синусоидальная нагрузка: частота (ω) и амплитуда (A) постоянны: $X(t) = A \sin(\omega t + \varphi)$.

За последние десятилетия многое изменилось в практике испытаний на усталость. Все чаще ученые используют нерегулярные процессы. Нерегулярный процесс означает блочную и псевдо-случайную нагрузку (рис. 1, а и б).

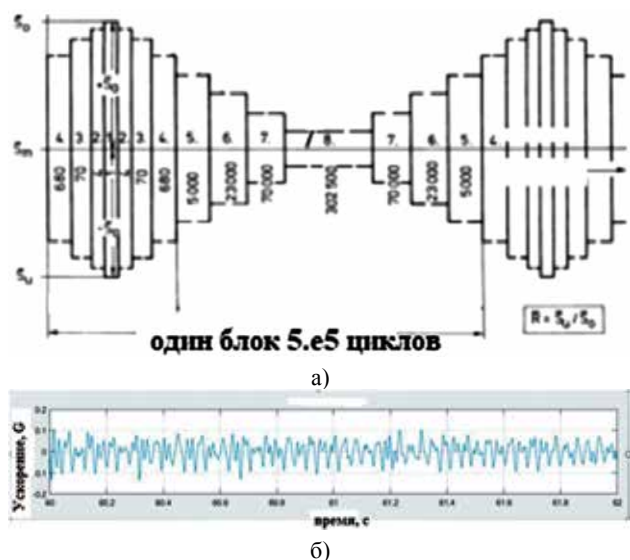


Рис. 1. Примеры блочной (а) и случайной (б) нагрузки. (1,б: Том Ирвин, инженер из Айовы, США, путешествовал на пароме 6 сентября 2021 года. Он записал следующие данные о вибрации, используя приложение акселерометра на своем Android Смартфон (Pixel 3 XL), который был помещен на небольшой столик между двумя сиденьями на пассажирской палубе).

Первоначально Гасснер предложил использовать блочную нагрузку для испытаний конструкций самолетов [1], а затем, с развитием технологии испытаний и программного обеспечения, все чаще использовались испытания при случайной нагрузке, поскольку они были ближе к фактической нагрузке машин в эксплуатации. Следует подчеркнуть, что методы испытаний развиваются, но методы расчета по большей части все еще тяготеют к базе, основанной на испытаниях при гармонической нагрузке.

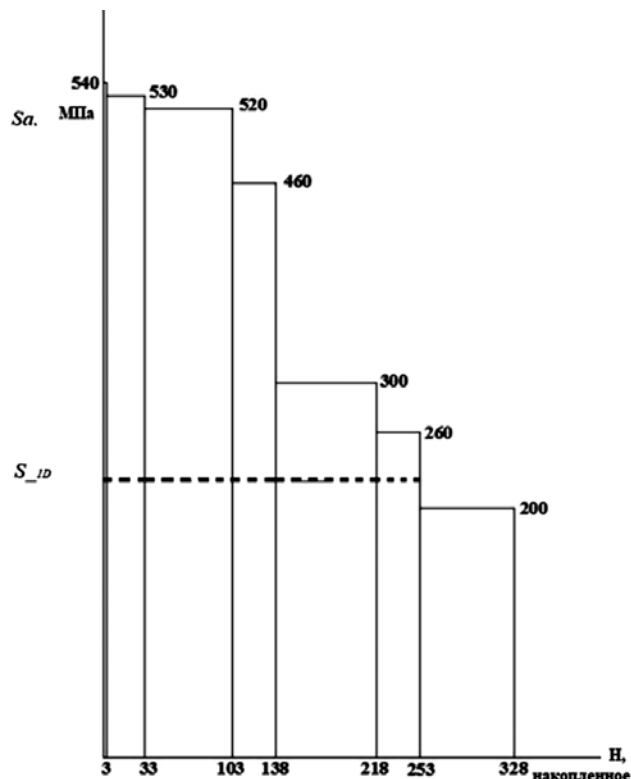
В настоящей статье далее показано, что можно судить о пороге повреждения, испытывая образцы при блочной нагрузке. Одной из тем, изучение которой представляется наиболее актуальным, является изучение порога (т.е. наибольшей из амплитуд напряжений, которые не влияют на накопление повреждений). Представляет интерес изучение этого явления как на стадии зарождения, так и на стадии распространения трещины [2]. Это важно:

а) с точки зрения ускорения испытаний – если напряжения не влияют на накопление повреждений, то от них можно отказаться во время испытаний;

б) для проведения расчетов долговечности с использованием обновленной информации о поведении кривой усталости в области гигацикловой долговечности.

Следует отметить, что проведение сертификационных испытаний только при гармонической нагрузке (построение обычной кривой усталости и кинетической диаграммы разрушения) больше не может удовлетворить пытливые умы ученых, изучающих усталость. Все больше исследователей склоняются к необходимости проведения испытаний при неравномерной нагрузке для определения свойств материала. Сундер [2] предлагает определить порог распространения трещины путем тестирования при неравномерной нагрузке в соответствии со специальной программой. Благодаря предложенному им подходу эксперимент не только очень близок к реальному рабочему нагружению, но и дает возможность изучить физику процесса распространения трещины. Таким образом, при испытании образцов алюминия с оригинальной псевдослучайной нагрузкой, основанной на стандарте TWIST, Сундер показал [2], как и каким именно образом чувствительное к последовательности остаточное напряжение вблизи вершины влияет на рост усталостной трещины.

Полученный результат позволил предложить метод оценки скорости роста трещины с учетом закрытия



трещины и влияния остаточных напряжений, образующихся при росте трещины. Относительно первой стадии усталости, а именно стадии зарождения трещины, мы можем упомянуть [3]. Чтобы преодолеть недостатки испытаний при регулярном нагружении, авторы [3] ввели так называемые «модельные кривые», которые основаны на нерегулярном тестировании в стандартных последовательностях (TWIST, FALSTAFF).

На рис. 2 показан блок нагрузки тракторной детали [4]. Некоторые нагрузочные ступени находятся ниже предела выносливости (пунктирная линия на рисунке). Основываясь на гипотезе линейного суммирования Майнера [5], они должны были бы быть отброшены в испытаниях и расчетах. Следует, однако, отметить, что есть два обстоятельства, которые препятствуют этому:

- 1) часто это отсутствие надежных данных о поведении кривой усталости для амплитуд напряжений, соответствующих сверхвысоких значениях циклов $N > 10^8$;
- 2) отсутствие информации о явлении деградации материала под действием эксплуатационной нагрузки (т.е. поведения материалов при наличии перегрузок).

Существуют многочисленные примеры того, как материалы, ранее считавшиеся обладающими неограниченной выносливостью, преодолевая плато, снова демонстрировали отказы при сверхвысоких числах циклов [6, 7]. Пример результатов таких испытаний для композитов показан на рис. 3. Если ранее не было возможности проводить такие испытания, то с 1980-х годов появилась такая техническая осуществимость [8] и в настоящее время является очень распространенным методом испытаний.

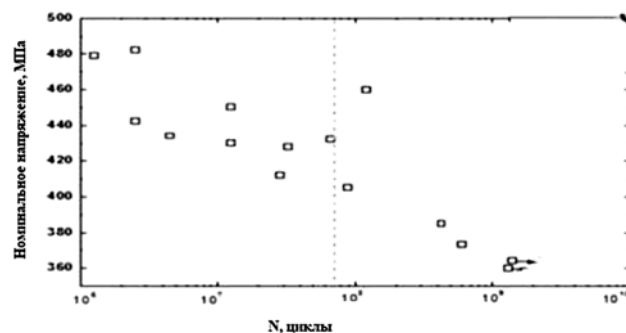


Рис. 3. Кривая усталости композитных образцов, изготовленных с использованием ультразвуковых частот нагружения [7].

Примеры из испытаний и эксплуатации

Имеются экспериментальные данные, указывающие на изменение показателей при проведении нерегулярных испытаний, а именно, ухудшение свойств материалов при эксплуатационной нагрузке, при которой неизбежно присутствуют перегрузки. В [9], наряду с хорошо известной «вторичной» кривой усталости, также называется кривой Гасснера [1], вводится понятие расчетно-экспериментальной модифицированной кривой усталости. Уравнение указанной кривой построено на

основе экспериментальных данных при тестировании, по меньшей мере, двух уровней нерегулярной (т.е. блочной или случайной) загрузки образцов. О ходе этой кривой также можно судить по результатам испытаний.

На стадии зарождения усталостной трещины существует высокий риск превышения порогового напряжения (здесь это называется неограниченным пределом усталости). Возможно, эта концепция – просто удобная абстракция. Общеизвестным фактом является то, что для цветных металлов и алюминиевых сплавов не существует неограниченного предела долговечности. Исследования в области гигацикловой усталости, интенсивно проводившиеся в самом начале текущего тысячелетия, пролили некоторый свет на этот вопрос [6]. В давние времена академик Серенсен выдвинул гипотезу о постепенном снижении предела выносливости [10]. В то же время существует очень нечеткая грань между кривой вторичной усталости (кривая Гасснера) и кривой усталости при перегрузках.

Наблюдения за сбоями в обслуживании, а также за ростом трещин при эксплуатационных нагрузках часто очень информативны с точки зрения проверки научных гипотез. Например, в практике наблюдения за распространением трещин в элементах гидравлических трубопроводов [11] развитие трещин было замечено при амплитудах напряжений ниже предполагаемого порогового уровня. Одной из возможных причин является влияние крайне редких значительных перегрузок при пусках (10–20 пусков в год) на частоте рабочих амплитуд 50–100 Гц. Чтобы оценить повреждающий эффект малых амплитуд в условиях перегрузки, целесообразно провести испытания с ранее образовавшейся трещиной в соответствии с эксплуатационным (в данном случае двухчастотным) блоком нагружения.

По мнению экспертов, точность оценки долговечности на 70% зависит от определения нагрузок. Исследователям очень важно договориться о том, что важнее для усталости – распределение (и последовательность) экстремумов, обработанных далее методом «дождевого потока», или усредненная характеристика стандартного отклонения (и его частотное распределение – спектральная плотность). Ответ на этот вопрос определяет важные вопросы регистрации и обработки процессов случайной нагрузки, в частности, метод идентификации пиков [12]. Вопросы выбора режимов создания обобщенного блока для расчета требуют тщательного анализа повреждающего действия комбинаций факторов.

Некоторые режимы обслуживания оказывают настолько незначительный вредный эффект, что их можно считать временем простоя – время проходит, а ресурс не расходуется. В то же время нельзя игнорировать фактор естественного старения материалов. Это явление характерно для композитов даже в большей степени, чем для металлов. Чтобы оценить изменчивость оценки, авторы предлагают использовать в расчетах метод адресных матриц Маркова [13]. Для оценки разброса усталостной долговечности на стадии распространения усталостной

трещины авторы используют метод моделирования пиков на основе целевых матриц Маркова, который позволит ориентироваться в выборе доступных моделей оценки на основе качественного эксперимента. Для анализа методов, основанных на спектральной плотности, требуется метод моделирования непрерывного процесса последовательностью экстремумов [14].

На рис. 4 мы схематично изобразили алгоритм, который позволяет моделировать случайную последовательность пиков для испытаний по адресной матрице Маркова. Выбор следующего экстремума в ряду выполняется на основе целевой матрицы, аналогичной по форме, показанной на рис. 4. Алгоритм использует генератор случайных чисел.

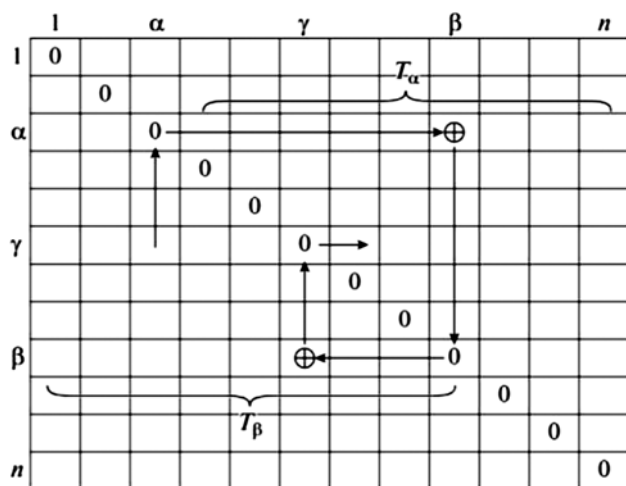


Рис. 4. Метод формирования случайной последовательности пиков по адресной матрице Маркова

Метод

Автор статьи предлагает метод, который позволяет делать выводы о поведении кривой усталости на основе эксплуатационных и лабораторных испытаний при неравномерной нагрузке, как более близкий к реальности. Такие испытания, благодаря наличию вибраций с малыми амплитудами в процессах нагружения, могут позволить косвенно оценить их вклад как на стадии зарождения, так и на стадии распространения трещины. Такое исследование также важно с точки зрения сокращения времени тестирования. В [9] для оценки параметров модифицированной кривой усталости A^* и m^* в виде уравнения Баскуина:

$$\lg(N) = A^* - m^* \cdot \lg(\sigma_a) \quad (1)$$

было предложено минимизировать ошибку линейной гипотезы методом наименьших квадратов:

$$\Psi = \sum_{i=1}^k \left[\lg\left(\sum_{j=1}^{\omega} \sigma_{aij}^{m^*}\right) - A^* \right]^2, \quad (2)$$

где n_i – число циклов с амплитудой σ_{ai} до разрушения. Поверхность ошибки для одной из выполненных серий испытаний при нерегулярной нагрузке выглядит следующим образом (рис. 5):

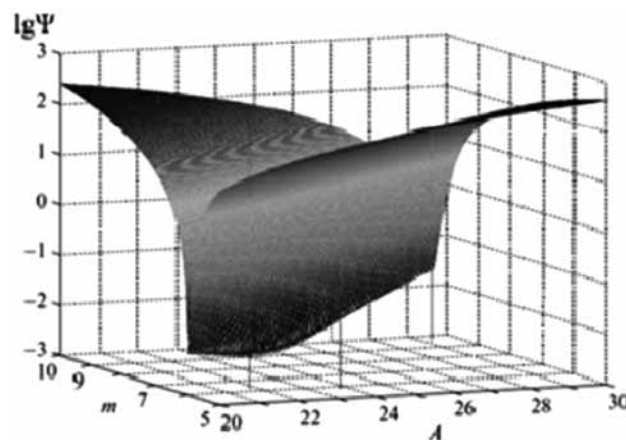


Рис. 5. Поверхность ошибки решения системы (2). Решение находится в точке минимума функции ошибки.

Значения ($m^* = 6,8$ и $A^* = 21,5$), обеспечивающие минимум Ψ , будут служить новыми константами в уравнении Баскуина (1). Это гарантирует несмещенную оценку долговечности по гипотезе Майнера для будущих расчетов.

Заключение

В этой статье мы хотели привлечь внимание читателей к возможности и полезности исследования усталостных свойств материалов при нерегулярном нагружении. Было показано, что при грамотно спланированном эксперименте можно получить важные результаты, касающиеся минимального порога напряжений при накоплении усталостных повреждений.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10097, <https://rscf.ru/project/23-29-10097/>

Библиографический список

1. Sonsino C.M., Heim R, Melz T. Lightweight-Structural Durability Design by Consideration of Variable Amplitude Loading // International Journal of Fatigue. 2016. Vol. 91. Part 2. Pp. 328-336. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2015.07.030
2. Sunder R. et al. Combined action of crack closure and residual stress under periodic overloads: A fractographic analysis // International Journal of Fatigue. 2016. Vol. 82. Part 3. Pp. 667-675.
3. Bautin A. et al. Model curves: a simple way to account for complex effects. In Proc. 32nd Congress of International Council of Aeronautical Science. Sept. 6-10, 2021, Shanghai, China.
4. Березин И.Я., Рихтер Е.Е., Абызов А.А. и др. Статистическая механика и надежность машин: Учебное пособие к курсовому проекту. Челябинск: ЮпГу, 2003. 59 с.
5. Miner M.A. Cumulative Damage in Fatigue // Journal of Applied Mechanics. 1944. Vol. 3. Pp. 159-164.
6. Bathias C. There is no infinitive fatigue life in metallic materials // Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct. 1999. Vol 22. Issue 7. Pp. 559-566.

7. Wei Xu et al. An Ultra-High Frequency Vibration-Based Fatigue Test and Its Comparative Study of a Titanium Alloy in the VHCF Regime // *Metals*. 2020. Vol. 10. P. 1415. DOI: 10.3390/met10111415

8. Stanzl-Tschegg S. Fatigue crack growth and threshold measured at very high frequencies (20 kHz) // *Metal Science*. 1980. Vol. 14(4). Pp. 137–143.

9. Makhutov N.A., Petrova I.M., Gadolina I.V. et al. On peculiarities in construction of a modified fatigue curve // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2010. Vol. 39. No. 4. Pp. 338–342.

10. Серенсен С.В., Когаев В.П., Шнейдерович Р.М. Расчеты несущей способности и прочности деталей машин. М.: Машиностроение, 1975. 488 с.

11. Georgievskaya E. The Problem of Early Crack Detection in the Runner Blades of Hydraulic Units // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2021. Vol. 50. No. 3. P. 216.

12. Gadolina I.V., Lisachenko N.G., Svirskiy Y. et al. The Choice of Sampling Frequency and Optimal Method of Signals Digital Processing in Problems of a Random Loading Process Treating to Assess Durability // *Inorganic Materials*. 2020. Vol. 56(15). Pp. 1551–1558. DOI: 10.1134/S0020168520150054

13. Makhutov N.A. et al. Imitation of Random Sequences of Extremums in Fatigue Tests with Irregular Loading // *Russian Engineering Research*. 2020. Vol. 40(8). Pp. 614–621. DOI: 10.3103/S1068798X2008016X

14. Makhutov N.A. et al. Simulation of Random Processes in the Fatigue Problem under Variable Loading // *Strength of Materials*. 2021. Vol. 52(8). Pp. 953–957. DOI: 10.1007/s11223-021-00249-3

References

1. Sonsino C.M., Heim R, Melz T. Lightweight-Structural Durability Design by Consideration of Variable Amplitude Loading. *International Journal of Fatigue* 2016;91(2):328–336. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2015.07.030.

2. Sunder R. et al. Combined action of crack closure and residual stress under periodic overloads: A fractographic analysis. *International Journal of Fatigue* 2016;82(3):667–675.

3. Bautin A. et al. Model curves: a simple way to account for complex effects. In: Proc. 32nd Congress of International Council of Aeronautical Science. Shanghai (China); 2021.

4. Berezin I.Ya., Rikhter E.E., Abyzov A.A. et al. [Statistical mechanics and dependability of machines: a study guide for a course project]. Chelyabinsk: YurGU; 2003. (in Russ.)

5. Miner M.A. Cumulative Damage in Fatigue. *Journal of Applied Mechanics* 1944;3:159–164.

6. Bathias C. There is no infinitive fatigue life in metallic materials. *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* 1999;22(7):559–566.

7. Wei Xu et al. An Ultra-High Frequency Vibration-Based Fatigue Test and Its Comparative Study of a Titanium

Alloy in the VHCF Regime. *Metals* 2020;10:1415. DOI: 10.3390/met10111415.

8. Stanzl-Tschegg S. Fatigue crack growth and threshold measured at very high frequencies (20 kHz). *Metal Science* 1980;14(4):137–143.

9. Makhutov N.A., Petrova I.M., Gadolina I.V. et al. On peculiarities in construction of a modified fatigue curve. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability* 2010;39(4):338–342.

10. Serensen S.V., Kogaiev V.P., Shneyderovich R.M. [Calculations of the carrying capacity and strength of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie; 1975. (in Russ.)

11. Georgievskaya E. The Problem of Early Crack Detection in the Runner Blades of Hydraulic Units. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability* 2021;50(3):216.

12. Gadolina I.V., Lisachenko N.G., Svirskiy Y. et al. The Choice of Sampling Frequency and Optimal Method of Signals Digital Processing in Problems of a Random Loading Process Treating to Assess Durability. *Inorganic Materials* 2020;56(15):1551–1558. DOI: 10.1134/S0020168520150054.

13. Makhutov N.A. et al. Imitation of Random Sequences of Extremums in Fatigue Tests with Irregular Loading. *Russian Engineering Research* 2020;40(8):614–621. DOI: 10.3103/S1068798X2008016X.

14. Makhutov N.A. et al. Simulation of Random Processes in the Fatigue Problem under Variable Loading. *Strength of Materials* 2021;52(8):953–957. DOI: 10.1007/s11223-021-00249-3.

Сведения об авторе

Гадолина Ирина Викторовна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация, e-mail: gadolina@mail.ru

About the author

Irina V. Gadolina, Candidate of Engineering, Associate Professor, Senior Researcher, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation, e-mail: gadolina@mail.ru.

Вклад автора

Автором был проведен обзор литературы по теме исследования, проанализировано влияние особенностей нагружения на поведение материалов в многоциклового области усталости, предложено использовать информацию о сопротивлении усталости при нерегулярном нагружении для корректировки информации о поведении кривой усталости

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Марковская модель надежности ветроэлектростанции¹

Markov reliability model of a wing farm

Иткин В.Ю.

Victor Yu. Itkin

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, Москва, Российская Федерация

Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, Russian Federation

itkin.v@gubkin.ru



Иткин В.Ю.

Резюме. Построена марковская модель надежности ветровой электростанции на примере станции на острове Анхольт, Дания. Вычислены показатели надежности оборудования одной турбины как функции скорости ветра. На основании часовых измерений скорости ветра и объема потребленной электроэнергии оценены длительности периодов удовлетворенного и неудовлетворенного спроса. Установлено, что распределения этих периодов можно приблизить смесью экспоненциальных распределений. Процесс функционирования станции приближается марковским процессом с 5-ю состояниями и непрерывным временем. В итоге получены оценки нестационарной и стационарной вероятностей того, что спрос на электроэнергию будет удовлетворен за счет энергии ветра.

Abstract. A Markov model of wind farm reliability based on the example of the station on the island of Anholt, Denmark, is constructed. Reliability indexes of equipment of one turbine as a function of wind velocity are calculated. Based on hourly measurements of wind speed and electricity consumption, the durations of periods of satisfied and unsatisfied demand are estimated. It is found that the distributions of these periods can be approximated by a mixture of exponential distributions. The plant operation process is approximated by a Markov process with 5 states and continuous time. As a result, estimates of non-stationary and stationary probabilities of electricity demand being met by wind power are obtained.

Ключевые слова: ветропарк, надежность, доступность, экспоненциальное распределение смеси, марковская модель.

Keywords: wind farm, reliability, availability, exponential mixture distribution, Markovian model

Для цитирования: Иткин В.Ю. Марковская модель надежности ветроэлектростанции // Надежность. 2023. №3. С. 28-37. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-3-28-37>

For citation: Itkin V.Yu. Markov reliability model of a wing farm. Dependability 2023:3:28-37. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-3-28-37>

Поступила: 02.04.2023 / **После доработки:** 06.07.2023 / **К печати:** 15.09.2023

Received on: 02.04.2023 / **Revised on:** 06.07.2023 / **For printing:** 15.09.2023

1. Введение

Доля возобновляемых источников на рынке электроэнергии постоянно растет, однако, на текущем этапе развития они не могут гарантированно обеспечить электроснабжение потребителей. Возобновляемые источники энергии зависят от достаточно существенных случайных факторов, таких, как скорость ветра или интенсивность инсоляции. В связи с этим необходимо использовать комбинированные системы электроснабжения, сочетающие как традиционные, так и возобновляемые источники энергии.

Изучение надежности таких систем позволяет оценить, какой запас мощности традиционных источников энергии необходимо иметь для покрытия дефицита в случае недостаточной выработки возобновляемых ис-

точников энергии. При этом необходимо учитывать и обычные отказы оборудования.

В данной работе в качестве примера мы рассматриваем одну из самых мощных ветроэнергетических станций – станцию на острове Анхольт, Дания. Станция построена в 2013 году, она состоит из 111 ветроэнергетических установок Siemens Gamesa Renewable Energy, SWT 3.6-120, максимальная мощность каждой из них равна 3,6 МВт. Вся станция может вырабатывать до 400 МВт, что составляет около 2,7 % потребности Дании в электроэнергии.

В литературе имеются многочисленные исследования моделей надежности ветровых электростанций и комбинированных систем энергетики.

В [1] исследуется марковская модель комбинированной электростанции с учетом надежности газовых

¹ Оригинальная статья опубликована: Victor Yu. Itkin. “MARKOV RELIABILITY MODEL OF A WIND FARM” Reliability: Theory & Applications, vol. 16, no. 4 (65), 2021, pp. 44-57. doi:10.24412/1932-2321-2021-465-44-57

и тепловых сетей, оценивается надежность поставок энергии для малого бизнеса в Германии в течение стандартного выходного дня. В [2] оцениваются оптимальные параметры комбинированной электростанции, состоящей из газовых и ветровых генераторов. Энергия ветра учитывается с помощью плотности вероятностей, оценка которой не вошла в эту статью. В [3, 4, 5] рассматриваются различные модели надежности ветровой электростанции, учитывающие зависимость интенсивностей отказов от скорости ветра. Значения скорости ветра моделируются методом Монте-Карло [3, 4] или с помощью марковских цепей [5]. В [6] показатели надежности станции вычисляются с помощью производящих функций. В [7] вырабатываемая мощность ветровой станции оценивается с помощью кубической модели, а скорость ветра аппроксимируется распределением Гнеденко-Вейбулла. Параметры распределения оцениваются по статистическим данным, причем измерения считаются независимыми, т.е. корреляционная структура последовательных измерений не учитывается. Корреляционная структура последовательных измерений скорости ветра учитывается в [8, 9] и др., где рассматриваются задачи краткосрочного прогнозирования скорости ветра на основе нейросетевых моделей, моделей ARIMA и др. Точность таких прогнозов невелика, поэтому мы строим прогноз вырабатываемой мощности только на основе реальных метеорологических данных. В [10, 11] представлены результаты статистического анализа зависимости показателей надежности оборудования ветротурбин от скорости ветра.

Модели, приведенные в некоторых из перечисленных статей, применяются в нашей работе при обработке большого объема статистических данных для конкретного объекта – станции Анхольт. В результате были выявлены статистические закономерности, позволившие построить марковскую модель и оценить показатели надежности станции.

Статья организована следующим образом. В разделе 2 оцениваются показатели надежности оборудования одной турбины в зависимости от скорости ветра. В разделе 3 исследуются данные и математические модели для оценки спроса на электроэнергию и возможности станции по ее производству. Там же представлена марковская модель функционирования станции и оценки показателей ее надежности. В разделе 4 кратко суммируются результаты исследования.

2. Надежность оборудования одной турбины

Вначале оценим показатели надежности оборудования станции. Для этого достаточно рассмотреть одну произвольную турбину. В качестве основного показателя надежности будем рассматривать стационарный коэффициент готовности:

$$K = \frac{T}{T + R},$$

где T – среднее время работы между отказами, R – среднее время ремонта.

Табл. 1. Среднее количество отказов в год $\bar{\lambda}_r$, 1/год

Элемент \ Тип отказа	Замена	Капитальный ремонт	Мелкий ремонт	Нет данных о затратах
Лопасты	0,001	0,010	0,456	0,053
Автоматические выключатели / реле	0,002	0,054	0,326	0,048
Элементы управления	0,001	0,054	0,355	0,018
Электрические компоненты	0,002	0,016	0,358	0,059
Коробка передач	0,154	0,038	0,395	0,046
Генератор	0,095	0,321	0,485	0,098
Смазка/масло/охлаждающая жидкость	0	0,006	0,407	0,058
Нагреватели / охладители	0	0,007	0,190	0,016
Центр	0,001	0,038	0,182	0,014
Другие компоненты	0,001	0,042	0,812	0,150
Крепеж	0,001	0,179	0,824	0,072
Блок питания	0,005	0,081	0,076	0,018
Насосы/двигатели	0	0,043	0,278	0,025
Безопасность	0	0,004	0,373	0,015
Датчики	0	0,070	0,247	0,029
Пункты обслуживания	0	0,001	0,108	0,016
Корпус/фундамент	0	0,089	0,092	0,004
Преобразователь	0,001	0,003	0,052	0,009
Поворотная система	0,001	0,006	0,162	0,020

В [10] установлено, что интенсивности отказов ветроэнергетической установки линейно зависят от скорости ветра в диапазоне скоростей $W=7-11$ м/с, однако экстраполяция этой зависимости на более широкий диапазон реальных скоростей ветра в районе острова Анхольт приводит к неправдоподобным результатам – прогноз интенсивности отказов для малых скоростей становится отрицательным (рис. 1). Естественно предположить, что при простое оборудование не отказывает, т.е. при нулевой скорости ветра интенсивность отказов также должна быть равна нулю. Эти соображения приводят нас к квадратичной модели без свободного члена:

$$\lambda(W) = b_1 W + b_2 W^2, \quad (1)$$

где $\lambda(W)$ – интенсивность отказов, 1/год, $b_1=0,353$ с/(год×м) и $b_2=0,0868$ с²/(год×м²) – коэффициенты модели, полученные методом наименьших квадратов. Рис. 1 показывает, что эта модель в диапазоне скоростей 7–11 м/с практически не отличается от линейной.

В [10] также приведены оценки среднего количества отказов (табл. 1) и средних времен ремонта различного оборудования ветряной турбины (табл. 2).

Интенсивности отказов оборудования также зависят от скорости ветра, как и интенсивности отказов всей турбины. Если предположить, что эта зависимость имеет вид (1), то ее можно оценить с помощью пропорциональной модели:

$$\lambda_i(W) = \frac{\bar{\lambda}_i}{\sum_k \bar{\lambda}_k} \lambda(W).$$

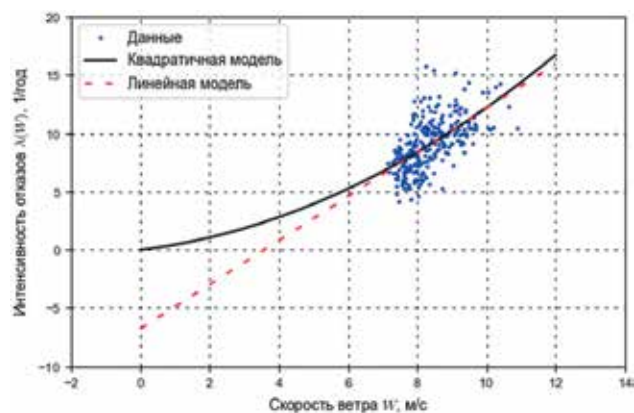


Рис. 1. Зависимость интенсивности отказов от скорости ветра

Предположим, что отказы оборудования независимы. Тогда одновременные отказы различных элементов маловероятны, ими можно пренебречь. Следовательно, среднее время ремонта всей установки можно вычислить по формуле полной вероятности:

$$R = \sum_k R_k p_k,$$

где p_k – условная вероятность отказа именно k -го элемента при условии, что произошел какой-то отказ. Эту вероятность можно оценить как параметр распределения Бернулли:

$$p_k = \frac{\lambda_k(W)}{\sum_i \lambda_i(W)} = \frac{\bar{\lambda}_k}{\sum_i \bar{\lambda}_i}.$$

Табл. 2. Среднее время ремонта R , ч

Элемент \ Тип отказа	Замена	Капитальный ремонт	Мелкий ремонт	Нет данных о затратах
Лопасты	288	21	9	28
Автоматические выключатели / реле	150	19	4	5
Элементы управления	12	14	8	17
Электрические компоненты	18	14	5	7
Коробка передач	231	22	8	7
Генератор	81	24	7	13
Смазка/масло/охлаждающая жидкость	–	18	4	3
Нагреватели / охладители	–	14	5	5
Центр	298	40	10	8
Другие компоненты	36	21	5	8
Крепеж	25	19	9	17
Блок питания	57	14	7	10
Насосы/двигатели	–	10	4	7
Безопасность	–	2	2	2
Датчики	–	6	8	8
Пункты обслуживания	–	2	7	9
Корпус/фундамент	–	7	5	6
Преобразователь	1	26	7	19
Поворотная система	49	20	5	9

Замечание. Если предположить, что поток отказов – пуассоновский, т.е. время работы между отказами распределено экспоненциально, то этот результат можно получить более строго:

$$p_k = P\{\xi_k < \xi_i, \forall i \neq k\} = \int_0^\infty \prod_{i \neq k} (1 - F_i(t)) dF_k(t) =$$

$$= \int_0^\infty \prod_{i \neq k} e^{-\lambda_i(W)t} \lambda_k(W) e^{-\lambda_k(W)t} dt = \frac{\bar{\lambda}_k}{\sum_i \bar{\lambda}_i},$$

где ξ_j – время работы между отказами элемента j , $F_j(t)$ – функция распределения времени между отказами элемента j .

Несмотря на то, что интенсивности отказов элементов зависят от скорости ветра, вероятность p_k от нее не зависит, если верно предположение об одинаковом влиянии скорости ветра на все оборудование установки.

Таким образом, среднее время ремонта установки равно

$$R = \frac{\sum_k R_k \bar{\lambda}_k}{\sum_i \bar{\lambda}_i} = 0,00153 \text{ лет} = 13,5 \text{ ч.}$$

Для оценки среднего времени работы между отказами рассмотрим процесс функционирования установки, т.е. количество циклов «работа – ремонт», как процесс восстановления. Среднее количество отказов к моменту t – это функция восстановления $H(t)$, которая согласно элементарной теореме восстановления [12] асимптотически равна

$$H(t) \approx \frac{t}{T + R}.$$

При $t=1$ год функция восстановления равна интенсивности отказов, поэтому

$$T \approx \frac{1}{\lambda(W)} - R,$$

откуда

$$K(W) = 1 - \lambda(W)R = 1 - 0,000542W - 0,000133W^2. \quad (2)$$

3. Марковская модель спроса и предложения электроэнергии

Для моделирования процесса функционирования станции мы будем использовать марковский процесс с непрерывным временем и дискретным множеством состояний. Такую модель можно считать корректной, если распределение времени пребывания в каждом состоянии хорошо приближается экспоненциальным законом. Рассмотрим модель с двумя состояниями: в состоянии 0 станция полностью обеспечивает своих потребителей, а в состоянии 1 энергии ветра недостаточно, необходимо использовать газ, уголь и т.д. Мы использовали только открытые источники информации, поэтому для оценки распределений времен пребывания в этих состояниях потребовались некоторые вычисления.

3.1. Расчет вырабатываемой мощности

На основании экспериментальных данных [13] была подобрана модель зависимости (3) мощности одной турбины от скорости ветра (рис. 2):

$$P(W) = 3,6 \left(1 - e^{-\exp(-7,6+0,23W)W^{2,5}} \right), \quad (3)$$

где W – скорость ветра, м/с, $P(W)$ – мощность турбины, МВт.

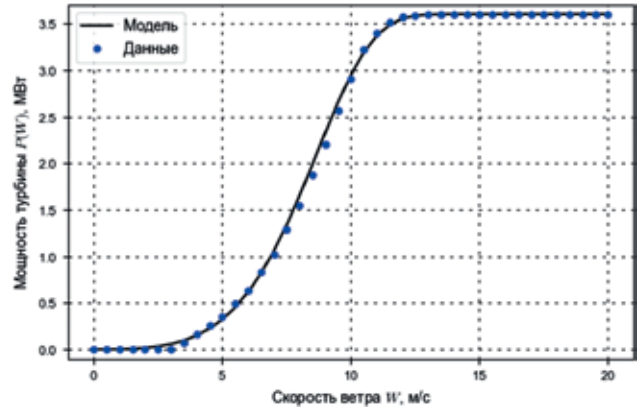


Рис. 2. Характеристика мощности турбины Siemens Gamesa Renewable Energy, SWT 3.6-120 [13]

Скорость ветра измеряется на высоте флюгера $h=10$ м [14], а мощность зависит от скорости ветра на высоте лопастей турбины, т.е. на высоте $z=90$ м. Для пересчета мы воспользуемся логарифмической моделью [15]:

$$W = W_h \frac{\ln z - \ln z_0}{\ln h - \ln z_0}, \quad (4)$$

где $z_0=0,0002$ м – параметр шероховатости [16].

Таким образом, зная скорость ветра на высоте флюгера, мы можем оценить мощность, вырабатываемую одной турбиной. Общая вырабатываемая мощность станции будет равна $N P(W)$, где N – количество работоспособных турбин, которое может быть меньшим номинального значения $n=111$ из-за отказов оборудования некоторых турбин.

Величина N имеет биномиальное распределение с вероятностью «успеха» $K(W)$, которая может быть вычислена по формуле (2). Количество турбин достаточно велико, поэтому распределение величины N можно аппроксимировать нормальным законом с математическим ожиданием $nK(W)$ и дисперсией $nK(W)(1-K(W))$. Задав некоторый доверительный уровень $1-\alpha$ и вычислив квантиль стандартного нормального распределения z_α , мы оценим количество работоспособных турбин через

$$Z(W) = n K(W) + z_\alpha \sqrt{n K(W)(1-K(W))}.$$

В этом случае реальное количество работоспособных турбин будет не меньше $Z(W)$ с вероятностью $1-\alpha$.

Таким образом, мы получим нижнюю оценку мощности, вырабатываемой станцией:

$$P_{Anholt}(W) = Z(W)P(W). \quad (5)$$

3.2. Периоды удовлетворенного и неудовлетворенного спроса

Электроэнергия, вырабатываемая станцией Анхольт, поступает в общую сеть Дании, поэтому невозможно указать, какие именно потребители получают данную электроэнергию. Следовательно, необходимо оценивать спрос на электроэнергию с Анхольта как долю общенационального спроса, предполагая, что она соответствует доле установленной мощности станции ($Q_{Anholt}=400$ МВт) в суммарной установленной мощности всех электростанций Дании $Q_{Denmark}$. В открытом доступе имеется информация об общей установленной мощности в период с 1990 по 2018 годы [17]. Для прогноза суммарной установленной мощности $Q_{Denmark}(y)$ на 2019 и 2020 годы была использована логарифмическая модель (рис. 3):

$$Q_{Denmark}(y) = a_0 + a_1(y - 1989) + a_2 \ln(y - 1989),$$

где y – время, выраженное в годах, коэффициенты $a_0=8749,49$, $a_1=88,25$, $a_2=967,3$ оценены методом наименьших квадратов.

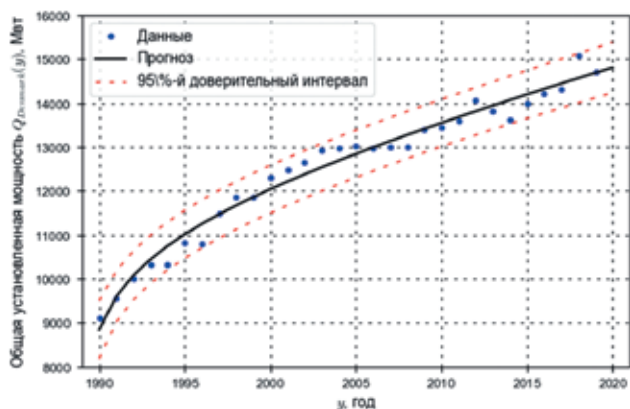


Рис. 3. Общая установленная электрическая мощность Дании

Согласно этой модели суммарная установленная мощность в 2019 году составила 14 700 МВт, а в 2020 – 14 800 МВт, поэтому доля станции Анхольт оценивается как 2,72% и 2,70% соответственно.

Используя часовые данные общего объема электропотребления Дании [18], мы получили оценку спроса на электроэнергию исследуемой станции:

$$C_{Anholt}(t) = \frac{Q_{Anholt}}{Q_{Denmark}(y)} C_{Denmark}(t),$$

где t – время, выраженное в часах, $y=y(t)$ – время, выраженное в годах, $C_{Denmark}(t)$ – общий объем электропотребления Дании, МВт/ч.

Используя часовые данные о скоростях ветра на острове Анхольт на высоте $h=10$ м, по формуле (4) получим значения скорости ветра $W(t)$ на высоте лопастей турбины для каждого часа t . Затем по формуле (5) вычислим мощность $P_{Anholt}(t) = P_{Anholt}(W(t))$, вырабатываемую всеми турбинами станции. Положительная разность $P_{Anholt}(t) - C_{Anholt}(t)$ определяет периоды удовлетворенного спроса, а отрицательная – неудовлетворенного. На рис. 4 представлен фрагмент данных с 28 марта по 2 апреля 2016 года.

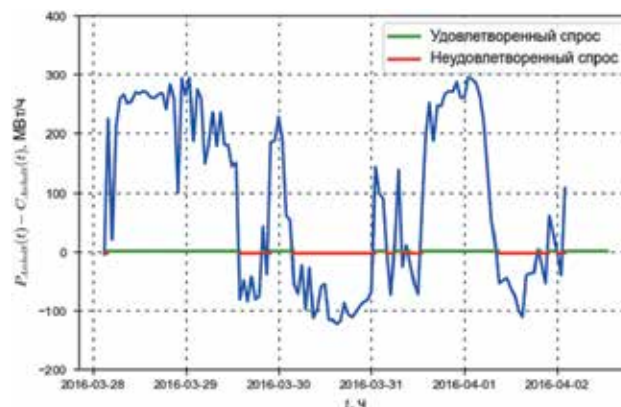


Рис. 4. Периоды удовлетворенного и неудовлетворенного спроса

Длительности периодов удовлетворенного и неудовлетворенного спроса зависят в основном от колебаний вырабатываемой мощности, т.е. от скорости ветра. Хотя колебания спроса имеют 3 цикла (суточный, недельный и сезонный), но их амплитуда значительно меньше, чем колебания вырабатываемой мощности. На рис. 5 представлен фрагмент данных с 9 по 21 января 2016 года.

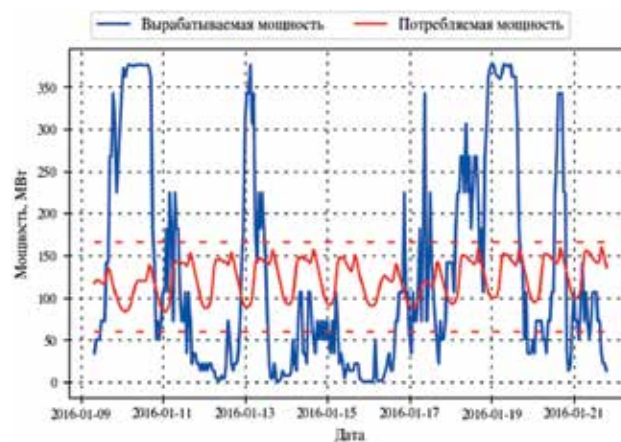


Рис. 5. Периоды удовлетворенного и неудовлетворенного спроса

Обработав данные за период 2016 – 2020 гг., мы получили две выборки: периоды удовлетворенного (2015 наблюдений) и неудовлетворенного (2016 наблюдений) спроса. Эти измерения слабо коррелированы друг с другом (рис. 6). Поэтому мы будем рассматривать их как выборки независимых наблюдений.

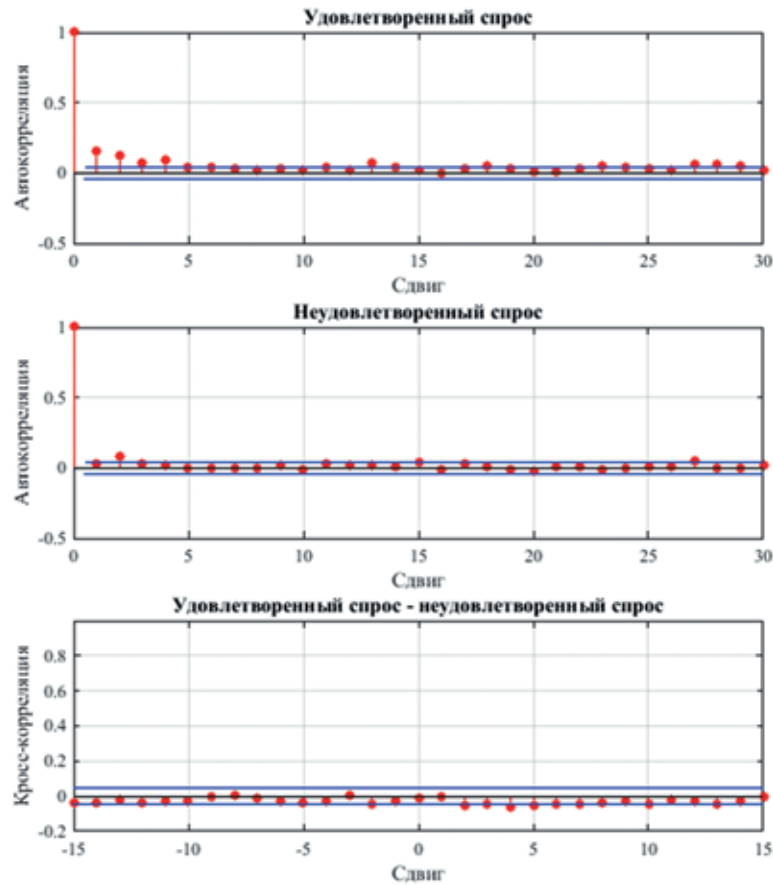


Рис. 6. Корреляционные функции периодов

Данные приближенно описываются смесью экспоненциальных распределений с плотностями вида

$$f(t) = \sum_{i=1}^k \frac{v_i}{\mu_i} e^{-\frac{t}{\mu_i}}.$$

Параметры μ_i – это математические ожидания экспоненциальных распределений, из которых состоит смесь, v_i – их весовые параметры. Для оценки параметров применялся ЕМ-алгоритм [19], который представляет собой модификацию метода максимального правдоподобия, адаптированного для смеси распределений. Параметры модели для распределения периодов удовлетворенного спроса равны

$$\vec{v} = [0,63; 0,19; 0,18];$$

$$\vec{\mu} = [2,2; 11,0; 43,6] \text{ ч},$$

а для распределения периодов неудовлетворенного спроса, соответственно,

$$\vec{v} = [0,66; 0,34];$$

$$\vec{\mu} = [2,4; 24,0] \text{ ч}.$$

На рис. 7 и 8 приведены гистограммы и графики эмпирических функций распределения (ЭФР) в вероятностном масштабе, показывающие адекватность данной

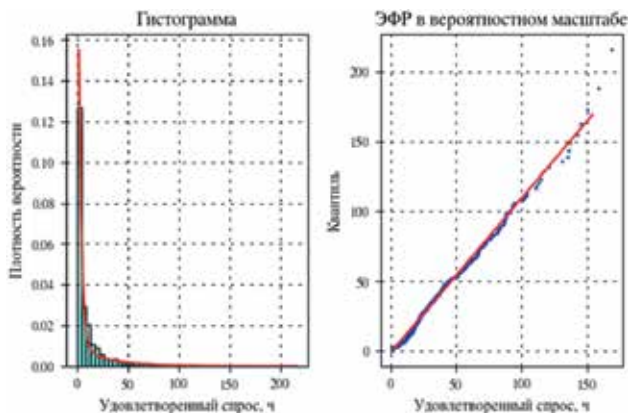


Рис. 7. Закон распределения периодов удовлетворенного спроса

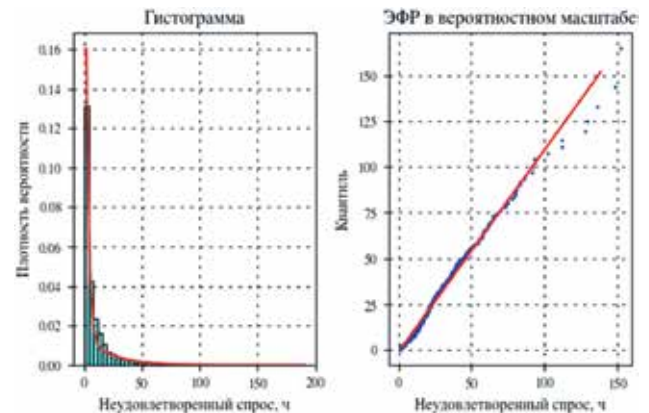


Рис. 8. Закон распределения периодов неудовлетворенного спроса

модели. Формальная проверка с помощью критерия Пирсона-Фишера не подтверждает согласие с предлагаемым распределением, поскольку выборки достаточно большие, и критерий обнаруживает незначительные отклонения выборочного распределения от гипотетического. Однако, при уменьшении объемов выборок в 4 раза (до 500 наблюдений) путем случайного отбрасывания части наблюдений мы получили p -значения 0,8 и 0,2, что значительно больше уровня значимости $\alpha=0,05$.

3.3. Марковская модель

Смесь экспоненциальных распределений можно интерпретировать следующим образом: каждое из реальных состояний процесса (0 – удовлетворенного и 1 – неудовлетворенного спроса) состоит из нескольких фиктивных (3-х и 2-х, соответственно) состояний. Время пребывания в каждом из них имеет экспоненциальное распределение. Перенумеруем фиктивные состояния: 0, 1 и 2 – состояния удовлетворенного спроса (зеленые вершины графа переходов на рис. 9), 3 и 4 – состояния неудовлетворенного спроса (красные вершины графа переходов на рис. 9). Интенсивности переходов обратно пропорциональны средним временам пребывания в начальных состояниях и прямо пропорциональны весовым коэффициентам конечных состояний:

$$\lambda_{ij} = \frac{v_j}{\mu_i}, \quad i, j = \overline{0, 4}.$$

Запишем интенсивности, оцененные по данным, в виде матрицы:

$$\Lambda = [\lambda_{ij}] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0,30 & 0,15 \\ 0 & 0 & 0 & 0,06 & 0,03 \\ 0 & 0 & 0 & 0,02 & 0,01 \\ 0,26 & 0,08 & 0,07 & 0 & 0 \\ 0,03 & 0,01 & 0,01 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

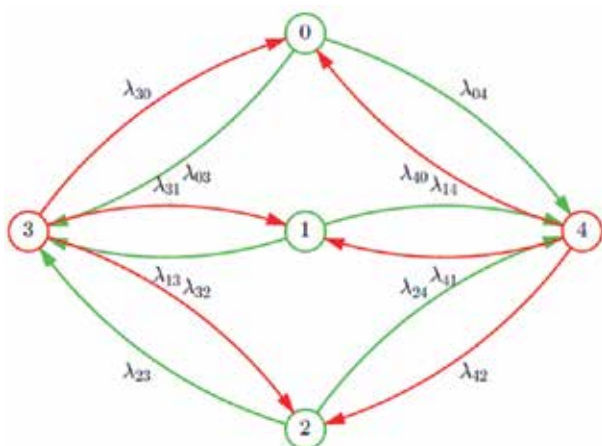


Рис. 9. Граф переходов марковской модели

Поскольку время пребывания в каждом из состояний имеет экспоненциальное распределение, процесс пере-

ходов между ними – марковский. Следовательно, вектор вероятностей пребывания в состояниях $\vec{p}(t)$ подчиняется уравнению Колмогорова [20]:

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \Lambda' \vec{p}, \quad \sum_{i=0}^4 p_i(t) = 1. \quad (6)$$

Подробный вывод этого уравнения можно найти в многочисленных учебниках и учебных пособиях, например в [21].

3.4. Исследование модели

Для получения однозначного решения необходимо задать начальное условие, выбрав одно из состояний в качестве стартового. При оперативном управлении в некоторый момент t мы можем отнести последний завершенный период к одному из фиктивных состояний, т.к. ЕМ-алгоритм позволяет не только оценивать параметры смеси распределений, но и классифицировать наблюдения.

Аналитическое решение уравнения (6) слишком громоздко, и мы его не приводим. Рекомендуется решать это уравнение численным методом, например явным методом Рунге-Кутты.

Вероятности реальных состояний (0 – удовлетворенного спроса, 1 – неудовлетворенного) – это суммы вероятностей фиктивных состояний:

$$p_0^*(t) = P\{P_{Anholt} \geq C_{Anholt}\} = p_0(t) + p_1(t) + p_2(t),$$

$$p_1^*(t) = P\{P_{Anholt} < C_{Anholt}\} = p_3(t) + p_4(t).$$

На рис. 10 приведены графики вероятностей удовлетворенного спроса при различных начальных состояниях, причем зеленым цветом отмечены графики, стартующие из состояний удовлетворенного, а красным – из состояний неудовлетворенного спроса.

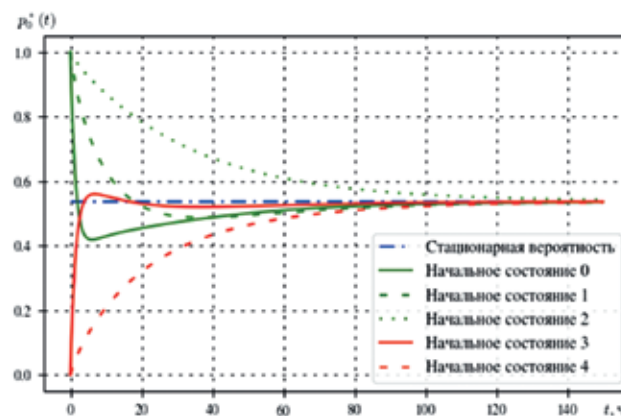


Рис. 10. Коэффициенты готовности станции для различных начальных состояний

Стационарные вероятности состояний $\vec{p} = \lim_{t \rightarrow \infty} \vec{p}(t)$ могут быть получены из формулы (6), если учесть, что

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{0}, \quad \text{т.е. } \Lambda^* \vec{p} = \vec{0}.$$

Это система линейных алгебраических уравнений. Ранг матрицы системы равен 4, что на 1 меньше, чем количество неизвестных вероятностей. Но, с условием нормировки $\sum p_i = 1$ система будет иметь полный ранг, ее единственное решение представлено в табл. 3.

Табл. 3. Стационарные вероятности состояний процесса

i	0	1	2	3	4
p_i	0,066	0,099	0,373	0,075	0,387

Процесс сходится к стационарному, но не очень быстро: только через 120 часов после старта вероятности состояния отличаются от его стационарных значений менее чем на 0,01. Стационарная вероятность удовлетворения спроса не зависит от начального состояния и равна

$$p_0^* = p_0 + p_1 + p_2 \approx 0,537,$$

Эта величина мало отличается от общей доли времени удовлетворенного спроса за исследованный период, что говорит об адекватности построенной модели:

$$\frac{T_0^*}{T_0^* + T_1^*} = 0,544,$$

где T_0^* – суммарное время удовлетворенного спроса, T_1^* – суммарное время неудовлетворенного спроса.

Таким образом, мощность ветропарка недостаточна для удовлетворения спроса на электроэнергию в среднем в 54% случаев. В остальное время потребители вынуждены дополнительно использовать другие источники энергии. В то же время количество энергии, вырабатываемой в периоды удовлетворения спроса, значительно превышает требуемое. Хотя промышленная технология длительного хранения электроэнергии, например, в водородной форме, к настоящему времени еще не разработана, исследования в этом направлении активно ведутся. Сохранение энергии в период ее избыточной выработки позволит покрыть ее дефицит в периоды слабого ветра.

4. Заключение

Обеспечение потребителей электроэнергией определяется как надежностью оборудования ветряной электростанции, так и погодными условиями. В нашей работе на основании статистических данных были построены модели, позволяющие оценить такие показатели надежности турбины, как интенсивность отказов, среднее время ремонта и коэффициент готовности, причем учитывалась зависимость интенсивности отказов от скорости ветра.

На основании статистических данных и известных математических моделей были исследованы распреде-

ления интервалов времени, в течение которого спрос на электроэнергию может быть удовлетворен за счет энергии ветра, и интервалов времени, в течение которых необходимо использовать энергию, полученную традиционными способами. На основании часовых наблюдений в течение 5 лет мы установили, что эти распределения можно аппроксимировать смесью экспоненциальных распределений, а следовательно, построить марковскую модель и оценить как нестационарный, так и стационарный коэффициенты готовности станции, который оказался равен 0,537.

Таким образом, в среднем в течение 54% времени мощности станции оказывается недостаточно для удовлетворения спроса на электроэнергию, в то время, как в периоды удовлетворенного спроса количество вырабатываемой энергии значительно больше необходимого. Хотя к настоящему моменту еще не создана промышленная технология длительного хранения электроэнергии, например в виде водорода, исследования в этом направлении активно ведутся. Сохранение энергии в период, когда она вырабатывается в избытке, позволило бы покрыть ее дефицит в периоды слабого ветра.

Благодарности

Автор выражает благодарность Ирине Вдовиной, которая нашла важные статистические данные, использованные в этой статье, и провела некоторые предварительные расчеты в рамках своей магистерской диссертации.

Библиорграфический список

1. Gaudenz K., Göran A. The influence of combined power, gas, and thermal networks on the reliability of supply // The Sixth World Energy System Conference, Torino, Italy, July 10-12, 2006.
2. Chen Sh., Sun G., Wei Zh. et al. Multi-time Combined Gas and Electric System Optimal Power Flow Incorporating Wind Power // Energy Procedia. 2016. Vol. 100. Pp. 111-116. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.10.147
3. Kim H., Singh C., Sprintson A. Simulation and Estimation of Reliability in a Wind Farm Considering the Wake Effect // IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2012. Vol. 3. Pp. 274-282.
4. Nath A., Paul S., Rather Z. et al. Estimation of Offshore Wind Farm Reliability Considering Wake Effect and Wind Turbine Failure // 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT Asia). 2019. Pp. 3866-3871. DOI: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8880887
5. Nguyen N., Almasabi S., Mitra J. Impact of Correlation Between Wind Speed and Turbine Availability on Wind Farm Reliability // IEEE Transactions on Industry Applications. 2019. Vol. 55. No. 3. Pp. 2392-2400. DOI: 10.1109/TIA.2019.2896152
6. Fazio A.R., Russo M. Wind farm modelling for reliability assessment // IET Renewable Power Generation.

2009. Vol. 2. Issue 4. Pp. 239-248. DOI: 10.1049/iet-rpg:20080005

7. Голдаев С.В., Радюк К.Н. Расчет производительности ветроэнергетической установки большой мощности по усовершенствованной методике // Известия Томского политехнического университета. 2015. Т. 326. № 8: Инжиниринг георесурсов. С. 17-22.

8. Рахманов Н.Р., Курбацкий В.Г., Гулиев Г.Б. и др. Краткосрочное прогнозирование выработки мощности ветроэнергетических установок для обеспечения надежности электрических сетей. В кн.: Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып.66: Актуальные проблемы надежности систем энергетики : материалы Международного семинара им. Ю.Н. Руденко. Минск: БНТУ, 2015. 454 с., ил.

9. Kurbatsky V.G., Tomin N.V. Use of the "ANAPRO" software to analyze and forecast operating parameters and technological characteristics on the basis of macro applications // Proceedings of IEEE Bucharest PowerTech, 28 June – 02 July 2009. P. 7. DOI: 10.1109/PTC.2009.5281905

10. Carroll J., McDonald A., McMillian D. Reliability comparison of wind turbines with DFIG and PMG drive trains // IEEE Transactions on Energy Conversion. 2015. Vol. 30(2). Pp. 663–670.

11. Wilson G., McMillan D. Assessing Wind Farm Reliability Using Weather Dependent Failure Rates // Journal of Physics: Conference Series. 2014. Vol. 524. 012181. DOI: 10.1088/1742-6596/524/1/012181

12. Севастьянов Б.А. (1974). Теория восстановления. Итоги науки и техн. Сер. Теор. вероятн. Мат. стат. Теор. кибернет. Том 11. М.: ВИНТИ, 1974. С. 99–128.

13. The wind power. Wind Energy Market Intelligence [Электронный ресурс]. URL: https://www.thewindpower.net/turbine_en_79_siemens_swt-3.6-120.php. (дата обращения 06.07.2023).

14. National Centers for Environmental Information [Электронный ресурс] URL: <https://www.ncei.noaa.gov/access/search/data-search/global-hourly> (Data); URL: <https://www.ncei.noaa.gov/data/global-hourly/doc/isd-format-document.pdf> (Description) (дата обращения 06.07.2023).

15. Рыхлов А.Б. Оценка параметров законов изменения средней скорости ветра с высотой в приземном слое атмосферы на юго-востоке европейской части России для решения задач ветроэнергетики // Изв. Саратов. ун-та. 2011. Том 11. Сер. Науки о Земле, вып. 2. С. 28-34.

16. Млявая Г.В. Влияние параметров шероховатости подстилающей поверхности на скорость ветра // Экология и география. 2014. № 2(323). С. 181-187.

17. Un data. A world of information [Электронный ресурс]. URL: <https://data.un.org> (дата обращения 06.07.2023).

18. Energi data service. Production and Consumption – Settlement [Электронный ресурс] URL: <https://www.energidataservice.dk/tso-electricity/productionconsumptionsettlement>. (дата обращения 06.07.2023).

19. Sundberg R. An iterative method for solution of the likelihood equations for incomplete data from exponential families // Communications in Statistics – Simulation and Computation. 1976. Vol. 5(1). Pp. 55–64. DOI: 10.1080/03610917608812007

20. Колмогоров А.Н. Об аналитических методах в теории вероятностей // Успехи математических наук. 1938. № 5. С. 5–41.

21. Рыков В.В., Иткин В.Ю. Надежность технических систем и техногенный риск: учеб. пособие. М.: ИНФРА-М, 2016. 192 с.

References

1. Gaudenz K., Göran A. The influence of combined power, gas, and thermal networks on the reliability of supply. In: Proceedings of the Sixth World Energy System Conference. Torino (Italy); 2006.

2. Chen Sh., Sun G., Wei Zh. et al. Multi-time Combined Gas and Electric System Optimal Power Flow Incorporating Wind Power. *Energy Procedia* 2016;100:111-116. DOI: 10.1016/j.egypro.2016.10.147.

3. Kim H., Singh C., Sprintson A. Simulation and Estimation of Reliability in a Wind Farm Considering the Wake Effect. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 2012;3:274-282.

4. Nath A., Paul S., Rather Z. et al. Estimation of Offshore Wind Farm Reliability Considering Wake Effect and Wind Turbine Failure. In: Proceedings of the IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT Asia); 2019. Pp. 3866-3871. DOI: 10.1109/ISGT-Asia.2019.8880887.

5. Nguyen N., Almasabi S., Mitra J. Impact of Correlation Between Wind Speed and Turbine Availability on Wind Farm Reliability. *IEEE Transactions on Industry Applications* 2019;55(3):2392-2400. DOI: 10.1109/TIA.2019.2896152.

6. Fazio A.R., Russo M. Wind farm modelling for reliability assessment. *IET Renewable Power Generation* 2009;2(4):239-248. DOI: 10.1049/iet-rpg:20080005.

7. Goldaev S.V., Radyuk K.N. Calculating the performance of high power wind turbine by the improved methodology. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering* 2015;326(8):17-22. (in Russ.)

8. Rakhmanov N.R., Kurbatsky V.G., Guliyev G.B. et al. [Short-term prediction of the power output of wind power plants for ensuring the reliability of power grids]. In: [Matters of the methodology of the dependability research of large energy systems. Issue 66: Topical matters of energy system dependability: Proceedings of the Yu.N. Rudenko International Workshop]. Minsk: BNTU; 2015. (in Russ.)

9. Kurbatsky V.G., Tomin N.V. Use of the "ANAPRO" software to analyze and forecast operating parameters and technological characteristics on the basis of macro applications. In: Proceedings of IEEE Bucharest PowerTech; 2009. P. 7. DOI: 10.1109/PTC.2009.5281905.

10. Carroll J., McDonald A., McMillian D. Reliability comparison of wind turbines with DFIG and PMG

drive trains. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 2015;30(2):663-670.

11. Wilson G., McMillan D. Assessing Wind Farm Reliability Using Weather Dependent Failure Rates. *Journal of Physics: Conference Series* 2014;524:012181. DOI: 10.1088/1742-6596/524/1/012181.

12. Sevastianov B.A. [Renewal theory]. *Itogi nauki i tekhn. Ser. Teor. veroyatn. Mat. stat. Teor. kibernet.* Vol. 11. Moscow: VINITI; 1974. Pp. 99-128. (in Russ.)

13. The wind power. Wind Energy Market Intelligence. (accessed 06.07.2023). Available at: https://www.thewindpower.net/turbine_en_79_siemens_swt-3.6-120.php.

14. National Centers for Environmental Information. (accessed 06.07.2023). Available at: <https://www.ncei.noaa.gov/access/search/data-search/global-hourly> (Data); <https://www.ncei.noaa.gov/data/global-hourly/doc/isd-format-document.pdf> (Description).

15. Rykhlov A.B. [Evaluating the parameters of the average wind speed variation laws at ground level in the South-East of Russia as part of wind energy initiatives]. *Izvestiya of Saratov University. Earth Science Series* 2011;11(2):28-34.

16. Mliavaya G.V. [The effect of the roughness parameters of the terrain on the wind speed]. *Ekologia i geografia* 2014. № 2(323). С. 181-187. (in Russ.)

17. UN data. A world of information. (accessed 06.07.2023). Available at: <https://data.un.org>.

18. Energi data service. Production and Consumption – Settlement. (accessed 06.07.2023). Available at: <https://www.energidataservice.dk/tso-electricity/productionconsumptionsettlement>.

19. Sundberg R. An iterative method for solution of the likelihood equations for incomplete data from

exponential families. *Communications in Statistics – Simulation and Computation* 1976;5(1):55-64. DOI: 10.1080/03610917608812007.

20. Kolmogorov A.N. [On the analytical methods in the probability theory]. *Uspekhi matematicheskikh nauk* 1938;5:5-41. (in Russ.)

21. Rykov V.V., Itkin V.Yu. [Dependability of technical systems and technology-related risk: a study guide]. Moscow: INFRA-M; 2016. (in Russ.)

Сведения об авторе

Иткин Виктор Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, доцент кафедры ПМ и КМ, М. Ленинский пр-т, 65, Москва, Российская Федерация, e-mail: itkin.v@gubkin.ru

About the author

Victor Yu. Itkin, Candidate of Engineering, Associate Professor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Senior Lecturer, Department of Applied Mathematics and Computer Modelling, 65 Leningradsky Prospekt, Moscow, Russian Federation, e-mail: itkin.v@gubkin.ru

Вклад автора

Автором выполнен анализ литературы, построена математическая модель надежности ветряной электростанции и получены оценки показателей надежности.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Общие положения обоснования функциональной безопасности интеллектуальных систем на железнодорожном транспорте

General provisions of the substantiation of functional safety of intelligent systems in railway transportation

Шубинский И.Б.^{1*}, Розенберг Е.Н.¹
Shubinsky I.B.^{1*}, Rozenberg E.N.¹

¹ АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), Москва, Российская Федерация

¹ Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation (JSC NIIAS), Moscow, Russian Federation

*igor-shubinsky@yandex.ru



Шубинский И.Б.



Розенберг Е.Н.

Резюме. Цель. Материал статьи направлен на решение задачи объективной и уверенной оценки состояния функциональной безопасности (ФБ) интеллектуальных систем управления (ИСУ). Традиционные методы применительно к ИСУ не позволяют достаточно уверенно оценить реальное состояние ФБ вследствие их специфических особенностей. К этим особенностям относятся, в первую очередь, нечеткая архитектура ИСУ и изменяющиеся связи между элементами системы. **Методы.** Для обоснования ФБ ИСУ необходимо применять весь арсенал известных методов и средств, рекомендованных ГОСТ 33432-2015 [1], включая организационные меры, определяемые требованиями к политике, программе обеспечения безопасности и к доказательству безопасности. Проанализированы возможности доказательства ФБ ИСУ с помощью экспериментальных, экспертных, аналитических и технологических методов, методов имитационного моделирования. Установлены ограничения ряда методов применительно к обоснованию ФБ ИСУ. **Результаты.** Предложен эвристический графовый полумарковский (Марковский) метод для доказательства ФБ системы. Рекомендовано для обоснования ФБ ИСУ применять эвристический графовый метод в сочетании с технологическим методом, который определен стандартами ГОСТ Р МЭК 61508 [2–4]. С их помощью возможно не только с уверенностью оценить состояние ФБ интеллектуальных систем, но и вырабатывать рекомендации по достижению приемлемых уровней безопасности таких систем.

Abstract. Aim. The paper aims to solve the problem of objective and confident functional safety (FS) evaluation of intelligent control systems (ICS). As regards ICS, the conventional methods, due to their particular features, do not allow for a sufficiently confident estimation of the actual state of FS. The above features include primarily the nondistinct architecture of ICS and the changing connections between the system elements. **Methods.** Substantiating ICS FS requires using the complete arsenal of known methods and means recommended in GOST 33432-2015 [1], including managerial measures defined by the requirements for the safety policy, program and case. The authors have analysed the capability to prove ICS FS using experimental, expert, analytical, technological, and simulation-based methods. The limitations of some methods as regards ICS FS substantiation have been established. **Results.** The authors suggest a heuristic graph-based semi-Markov (Markov) method of proving system FS. For the purpose of substantiating ICS FS, it is recommended using the heuristic graph-based method combined with the technological method defined in GOST R IEC 61508 [2–4]. They don't only allow confidently evaluating the FS of intelligent systems, but developing recommendations for achieving acceptable safety levels of such systems.

Ключевые слова: Безопасность функциональная, подтверждение безопасности, обоснование безопасности, программа обеспечения безопасности, доказательство безопасности, экспериментальный метод доказательства, экспертный метод, технологический метод доказательства, эвристический графовый полумарковский метод доказательства, доказательство с помощью имитационного моделирования.

Keywords: functional safety, safety confirmation, safety justification, safety program, safety case, experimental evidence, expert method, technological evidence, heuristic graph-based semi-Markov evidence, simulation-based evidence.

Для цитирования: Шубинский И.Б., Розенберг Е.Н. Общие положения обоснования функциональной безопасности интеллектуальных систем на железнодорожном транспорте // Надежность. 2023. №3. С. 38-45. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-3-38-45>

For citation: Shubinsky I.B., Rozenberg E.N. General provisions of the substantiation of functional safety of intelligent systems in railway transportation. Dependability 2023;3:38-45. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-3-38-45>

Поступила: 17.05.2023 / **После доработки:** 29.06.2023 / **К печати:** 15.09.2023

Received on: 17.05.2023 / **Revised on:** 29.06.2023 / **For printing:** 15.09.2023

1. Введение

Использование накопленных знаний и формирование на их основе новых знаний – это научное направление получило свое развитие еще в 80-х годах прошлого века. Основная цель состояла в формировании экспертных оценок для решения многих прикладных задач, и, в первую очередь, для задач управления. Развитие вычислительных средств обеспечило возможность применения технологии Big Data для накопления и обработки огромных массивов неструктурированных данных. Чтобы работать с такими данными, применяют математическую статистику и методы машинного обучения с помощью алгоритмов Data Science, что позволяет формировать прогнозные модели и в итоге оптимально решать поставленные задачи.

На железнодорожном транспорте эти технологии также получили применение [5–8 и многие др.]. Особенно важную роль они играют в задачах автоведения подвижного состава. Здесь сформировалась достаточно общая архитектура автоматизированной системы управления, основанной на знаниях. Структура такой системы приведена на рис. 1.

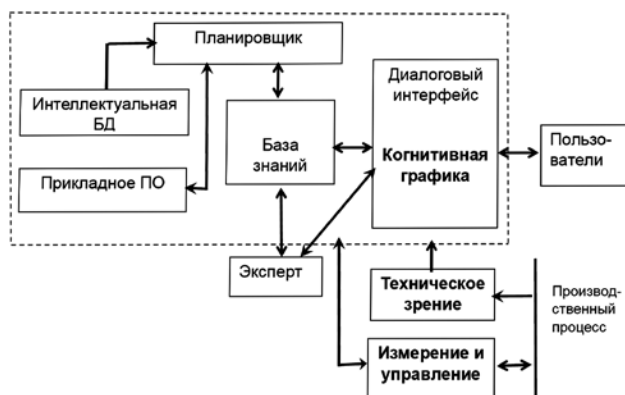


Рис. 1. Структурная схема интеллектуальной автоматизированной системы управления

Типовая часть интеллектуальной автоматизированной системы управления (ИСУ) (на рис. 1 обведена штриховой линией) содержит базы знаний и данных, планировщик, прикладное программное обеспечение (ПО) и диалоговый интерфейс. Эта часть системы имеет статичную структуру, практически не подвергается внешним возмущающим воздействиям, оперирует алгоритмами с постоянными параметрами и т.д. Автоведение подвижного состава управляется с помощью

ИСУ, содержащей наряду с типовой частью развитые средства технического зрения, адаптивного управления и когнитивной графики (на рис. 1 эти средства системы обозначены жирным шрифтом). Они формируются на основе методов машинного обучения нейронных сетей. В ИСУ на железнодорожном транспорте в интересах оптимизации стоимости и функциональной безопасности стали применяться такие новые технологии как виртуальные каналы обработки информации, цифровые двойники, в также их сочетания совместно со средствами автоведения. Все это в совокупности и определяет следующие специфические особенности ИСУ:

Нечеткая архитектура системы;

1. Наличие технического зрения и зависимость от погодных условий;

2. Тесное информационное взаимодействие системы с реальным миром по информационным каналам связи;

3. Наличие большого и не всегда определенного количества уязвимостей в системе, тесно связанной с внешней средой;

4. Высокая вероятность изменения внешних воздействий из реального мира и изменения поведения системы при этом;

5. Изменение параметров алгоритмов управления в результате обучения нейронных сетей с помощью поступающих информационных потоков и накопленных баз данных;

6. Разветвленное программное обеспечение как типовой части системы, так и, особенно, средств обнаружения и управления движением подвижного состава.

Здесь следует отметить, что одной из ключевых особенностей ИСУ является то, что наряду с нечеткой архитектурой существенно изменяются связи в системе. Последнее обстоятельство значительно ограничивает возможности доказательства безопасности интеллектуальной системы.

2. Постановка задачи

При большой неопределенности как в архитектуре, так и в условиях функционирования системы, весьма проблематично доказывать ее функциональную безопасность, опираясь на традиционные методы, например, приведенные в СТО РЖД 1.19.009-2009 [9], которые широко применялись к устройствам и простым системам с установленным и ограниченным количеством уязвимостей. В ИСУ практически невозможно экспериментальным или/и расчетным путем доказать соответствие

уровня безопасности заданным требованиям (см. раздел 3 данной статьи). Следовательно, нужно изыскивать все доступные способы, чтобы убедиться в возможности (или невозможности) эксплуатировать ИСУ с приемлемым уровнем безопасности. Хорошим подспорьем в этом отношении могут служить рекомендации стандартов ГОСТ Р МЭК 61508-1-2012 (разделы 6, 8) [2], ГОСТ Р МЭК 61508-2-2012 [3], ГОСТ ИЕС 61508-3-2018 [4], ГОСТ Р МЭК 62279-2016 [10]. В этих стандартах для оценки уровня функциональной безопасности сложных программно-аппаратных комплексов предложено наряду с традиционными подходами к доказательству учитывать технологию проектирования и изготовления, организацию работ по обеспечению качества и функциональной безопасности этих комплексов и их составных частей. Эти мероприятия и процедуры совместно решают задачи обоснования безопасности. Составная часть обоснования безопасности предусматривает подтверждение соответствия заданным требованиям, что в значительной мере реализуется с помощью методов доказательства безопасности. Развитие этого подхода в сочетании с накопленным методическим материалом на железнодорожном транспорте нашло отражение в стандарте ГОСТ 33432-2015 [1].

Применительно к интеллектуальным системам с указанными в разделе 1 особенностями в данном стандарте рекомендован следующий состав работ по обоснованию безопасности:

Разработка политики обеспечения функциональной безопасности (ФБ);

Разработка программы обеспечения ФБ;

Разработка доказательства ФБ.

Политика обеспечения ФБ должна быть сформирована в организации разработчике ИСУ и является общей при разработке всех изделий этой организации. Она должна предусматривать решение следующих основных вопросов:

- цели и задачи обеспечения ФБ;
- принципы и подходы к обеспечению ФБ;
- принципы управления рисками, связанными с ФБ;
- организация обеспечения ФБ.

Для управления рисками в работе [11] предложено применять материалы проекта АТО-RISK, заказанного немецким центром исследований железнодорожного транспорта. Этот проект направлен на определение критерия приемлемости рисков для автоматизированного вождения по железной дороге. Как описано в работе [11], для оценки уровня риска проводится явный анализ риска в зависимости от функции, либо используются справочные системы. Явный анализ рисков проводится путем оценки различных сценариев на основе полуколичественного подхода с помощью матрицы баллов риска. В матрице качественно дифференцируют ожидаемую степень ущерба в соответствии с классами аварий. Указанный подход может быть рекомендован при решении задач формирования политики безопасности ИСУ.

Программа работ по обеспечению ФБ и доказательство ФБ разрабатываются для каждого изделия автономно и предназначены для представления заказчику в качестве доказательства того, что изделие выполнено качественно, согласно требованиям стандартов по ФБ и соответствует заявленному уровню полноты безопасности (УПБ).

Программа работ по обеспечению ФБ наряду с разделами «Нормативные ссылки», «Характеристика объекта», «Порядок отчетности», «Порядок корректировки» содержит два следующих ключевых раздела:

- Мероприятия по обеспечению ФБ;
- Организация работ по обеспечению ФБ.

На рис. 2 приведен перечень работ по реализации ключевых разделов Программы работ по обеспечению безопасности (ПОБ).

Важно подчеркнуть, что наряду с решением задач по обеспечению ФБ, анализу опасностей и управления рисками, верификации и валидации ИСУ большое значение придается вопросам организации работ. Эти работы предусматривают подготовку и аттестацию должностных лиц в области ФБ, организацию взаимодействия с соисполнителями и заказчиком, организацию материально-технического обеспечения.

Конечная цель мероприятий по обеспечению ФБ ИСУ состоит в подготовке доказательства безопасности.

В состав работ по доказательству ФБ (рис. 3) входят отчеты не только по состоянию ФБ, но и о принятых разработчиком ИСУ мерах по управлению качеством и обеспечению ФБ. Эти отчеты

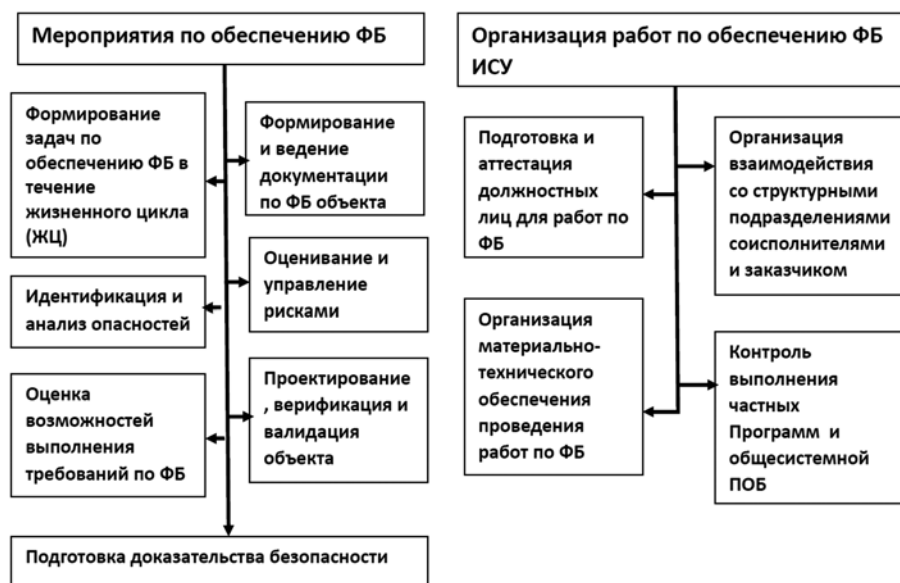


Рис. 2. Перечень работ по реализации разделов ПОБ

позволяют заказчику оценить уровень и качество производства ИСУ, включая поставки комплектующих, организацию и технологический уровень работ по обеспечению ФБ, результаты оценки рисков, глубину и качество работ по верификации и валидации требованиям ФБ.

Заклучение о соответствии ИСУ требованиям ФБ формируется на основе материалов отчета о состоянии ФБ с учетом указанных ранее отчетов по мерах по управлению качеством и ФБ. Это очень существенный момент. Дело в том, что нечеткая архитектура ИСУ, изменение параметров алгоритмов управления в результате обучения нейронных сетей и другие особенности функционирования интеллектуальных систем не способствуют гарантированной оценке состояния их ФБ. Использование материалов отчетов о принятых мерах по управлению качеством и ФБ значительно усиливает информационное описание системы и повышает уверенность в достоверности оценки состояния ее ФБ.

Непосредственно отчет о состоянии ФБ включает в себя как материалы исследования в отношении подтверждения соответствия заданным требованиям по ФБ, так и результаты экспериментальной оценки работоспособности и защищенности системы от одиночных отказов. Экспериментальная оценка производится на основе согласованной с испытательной лабораторией программы и методики испытаний.

Подтверждение соответствия заданным требованиям по ФБ играет ключевую роль в документе Доказательство ФБ системы. Вместе с тем, применительно к ИСУ подтверждение ее соответствия требованиям ФБ представляет собой достаточно сложную задачу. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

3. Подтверждение соответствия ИСУ заданным требованиям по ФБ

Для подтверждения соответствия ИСУ требуемому уровню ФБ можно рекомендовать следующие методы:

- экспериментальные;
- экспертные;
- имитационные;
- аналитические;
- технологические.

Состав работ по доказательству ФБ приведен на рис. 3.

Экспериментальные методы позволяют наиболее объективно количественно оценить состояние ФБ системы при условии того, что установлена их реа-



Рис. 3. Состав работ по доказательству ФБ

лизуемость и достоверность. Вопрос реализуемости находится в прямой зависимости от требований к ФБ. Для характерного требования к уровню полноты безопасности ИСУ с частыми запросами на выполнение задач составляет УПБ 2, что соответствует требуемому диапазону значений интенсивности опасных отказов системы $\lambda_{оп} = (10^{-7} - 10^{-6})/ч$. При этом вероятность опасных отказов системы в течение часа работы должна находиться в диапазоне значений $Q_{оп}(1) = 10^{-7} - 10^{-6}$ [2]. При этих требованиях для экспериментального определения только одного опасного отказа потребуются провести не менее $N \geq \frac{1}{Q(1)} = (10^7 - 10^6)$ испытаний. Поскольку

каждое испытание следует проводить в течение времени не менее одного часа, то для определения только одного опасного отказа потребуются затратить более 100 лет. При экспоненциальном распределении (что типично для распределения времени между опасными отказами) для получения достоверности испытаний на уровне доверительной вероятности 0,9 потребуются наблюдать не менее 10 событий опасных отказов, что вынудит увеличить время испытаний еще в несколько раз. Все это ставит под сомнение реализуемость применения экспериментальных методов испытаний.

Экспертные методы в принципе позволяют косвенно подтвердить или не подтвердить соответствие ИСУ заданным требованиям по ФБ. Естественно, что косвенная оценка не может быть самостоятельной – она должна использоваться как дополнение к другим оценкам. Технология экспертной оценки показателей сложных систем хорошо развита, так же, как и математический аппарат обработки мнений экспертов. Однако применение этих

методов к вопросам оценки уровня ФБ системы имеет ряд сложностей. Прежде всего, опыт эксплуатации ИСУ на железнодорожном транспорте еще незначителен. Накопленных знаний явно недостаточно. Следовательно, трудно рассчитывать на приемлемый уровень компетенции экспертов по этой тематике. Кроме того, в различных отраслях, в частности на железнодорожном транспорте, очень ограничен круг специалистов в области ФБ. Поэтому весьма проблематично подобрать достаточное число экспертов и оценить согласованность их мнений. Однако нужно стремиться к этому, что позволит в определенной мере использовать экспертные методы для подтверждения соответствия ИСУ.

Методы имитационного моделирования – широко применяемые при разработке и испытаниях. Они основаны на методе Монте-Карло. Метод имитационного моделирования Монте-Карло позволяет с помощью датчиков псевдослучайных чисел смоделировать практически весь известный спектр входных, промежуточных и возмущающих воздействий на систему, обработать их путем программной имитации системы и сформировать выходные результаты в зависимости от смоделированных данных. Однако этот метод имеет крупный недостаток – разброс выходных результатов от реализации к реализации. Для сокращения разброса выходных результатов, т.е. уменьшения их дисперсии, необходимо большое количество реализаций модели, что, в свою очередь, приводит к резкому увеличению времени моделирования. Для сокращения времени моделирования разработан ряд методов понижения дисперсии. К ним относятся: модифицированный метод Монте-Карло (например, моделирование по ценности данных и результатов), метод дополняющих переменных, метод расслоенной выборки и др. Более эффективные результаты в понижении дисперсии обеспечивает метод взвешенного моделирования или иначе метод значимой выборки. На основе этого метода нами был разработан метод имитационного моделирования на основе полунатурных испытаний [12] путем искусственного введения в систему неисправностей (сбоев, помех, программных ошибок). Несмотря на очевидные успехи в области имитационного моделирования, эти методы имеют ряд существенных недостатков, вследствие которых их применение к исследованию ИСУ ограничено.

Основными ограничениями в применении методов имитационного моделирования применительно к ИСУ являются:

1. Требуется детальное описание моделируемой системы и ее особенностей, что для такой сложной системы (см. рис. 1) требует значительных усилий и связанного с ними большого объема работы;
2. Большая себестоимость создания имитационной модели системы;
3. Требуется доказательство адекватности модели реальной системе;
4. При каждом уточнении структуры системы и при доработках ее алгоритмов требуется выполнять работы,

указанные выше в пп. 1 и 3, фактически это сводится к созданию новых имитационных моделей.

Аналитические методы – основной инструмент доказательства ФБ систем. Однако возможность их применения к задачам обоснования безопасности ИСУ вызывает определенные сомнения. Это связано, в первую очередь, с нечеткой архитектурой таких систем и, следовательно, трудностями (а порой невозможностью) формализовать задачи доказательства безопасности. Для преодоления этой проблемы нами предлагаются *эвристические полумарковские (Марковские) графовые методы*. Дело в том, что решение неформализованных задач доказательства безопасности систем с нечеткой архитектурой базируется на *эвристиках* – некоторых собственных представлениях человека, правилах, позволяющих сократить пространство перебора при поиске решения.

Суть разработанных методов [13, 14, 15] состоит в сочетании эвристики в представлениях данных и математических моделей безопасности и надежности системы со строгими математическими методами анализа. Примерами возможностей графовых математических методов для анализа ФБ могут служить некоторые приведенные ниже формулы расчета ряда показателей безопасности:

- *вероятность первого попадания системы из i -го начального неопасного состояния ($i \in S_H, S_H \cap \bar{S}_H = \emptyset, S_H \cap \bar{S}_H = S$) в любое опасное состояние $i \in \bar{S}_{PB}, i \in \bar{S}_H$ определяется выражением:*

$$b_{if} = \frac{\sum_{f \in \bar{S}_H} \sum_k l_k^{if} \Delta G_k^i}{\Delta G_{\bar{S}_H}};$$

- *средняя наработка до защитного отказа*

$$T_3 = \frac{T_0 \Delta G_{S_3 \cup \bar{S}_H}^0 + \sum_k l_k^{0i} T_i \Delta G_k^i}{\Delta G_{S_3 \cup \bar{S}_H}};$$

- *среднее время между опасными отказами*

$$T_B = \frac{\sum_{i \in S_H} \Delta G^i T_i}{\sum_{i \in S_H} \Delta G^i \sum_{j \in \bar{S}_H} p_{ij}};$$

- *коэффициент безопасности системы*

$$K_B = \frac{\sum_{i \in S_H} \Delta G^i T_i}{\sum_{j \in S} \Delta G^j T_j},$$

где $G(S, H)$ – ориентированный граф состояний, S – конечное множество вершин (состояний) системы; H – конечное множество дуг между вершинами i, j (состояния S_i, S_j); T_i – математическое ожидание безусловного времени пребывания системы в i -ом состоянии; p_{ij} – вероятность перехода из состояния i в состояние j графа; l_k^{if} – k -ый путь, ведущий из неопасного состояния

графа $i \in \bar{S}_H$ в опасное состояние $f \in \bar{S}_H$; – вес разложения графа без i -ой вершины и вершин графа, расположенных на k -ом пути; ΔG_{S_i} – вес разложения графа без вершин множества опасных состояний; $\Delta G_{S_i \cup \bar{S}_H}$ – вес разложения графа без множества опасных состояний $\bar{S}_H$ и множества защитных состояний S_i .

Весы разложений графа рассчитываются по формуле Мэзона:

$$\Delta G = 1 - \sum_i C_i + \sum_{i,j} C_i C_j - \sum_{i,j,r} C_i C_j C_r + \dots$$

где $C_i, C_j, \dots$ – веса контуров на графе.

Принятые критерии опасного и защитного отказов.

Критерий опасного отказа в виде множества состояний опасного отказа $\bar{S}_n \subset S$, где $S_n \cap \bar{S}_n = \emptyset$, $S_n \cup \bar{S}_n = S$, множества работоспособных или неопасных состояний $S_n \subset S$, а также начальное состояние $0 \equiv S_0$ (или $i \equiv S_i$), где $S_i \subset S_n$;

Критерий защитного отказа в виде множества защитных состояний $S_i \subset S_n$, множества работоспособных или неопасных и незащитных состояний $\bar{S}_i \subset S_n$, где $S_i \cap \bar{S}_i = \emptyset$, $S_i \cup \bar{S}_i = S_n$, а также начальное состояние $0 \equiv S_0$ (или $i \equiv S_i$), где $S_i \subset \bar{S}_i$.

В условиях неопределенности или отсутствия некоторых данных и нечеткости архитектуры системы аналитическая оценка безопасности системы достигается путем многоэтапных расчетов, которые состоят в реализации следующей цепочки действий (рис. 4).

При наличии доверенных сведений и данных достаточно ограничиться только отдельными действиями, например построением графа, определением формульных выражений, расчетом и анализом результатов. Другие действия, например, экспертная оценка исходных данных, определение наиболее значимых факторов, упрощение расчетных формул, уточнение условий для построения графа, повторное построение (или повторные построения) графа ФБ ИСУ возникают по мере необходимости в зависимости от наличия или отсутствия информации, которой располагает оценщик ФБ системы. В работах [16–20] при аналитической оценке ФБ интеллектуальных систем с виртуальными каналами, цифровыми двойниками, систем автоведения подвижного состава, автоведения маневровых локомотивов соответственно нами выполнялись практически все указанные на рис. 4 действия, поскольку были

недостаточно достоверные данные об архитектурах исследуемых систем, неполные сведения об исходных случайных величинах и их законах распределения. Вместе с тем, полученные результаты позволили не только в определенной мере оценить ожидаемые уровни полноты безопасности исследуемых систем, но, что особенно важно, и выработать рекомендации по достижению приемлемых уровней их функциональной безопасности. Полученные в указанных работах результаты согласуются с инженерными оценками безопасности исследуемых систем и соответствуют практическим наблюдениям за безопасностью опытных образцов интеллектуальных систем.

Вместе с тем, вследствие неполноты и нечеткости исходных данных и вследствие отмеченных выше специфических особенностей интеллектуальных систем эвристические графовые методы не в полной мере обеспечивают высокий уровень уверенности в результатах оценки состояния ФБ.

Для повышения уверенности при оценивании ФБ целесообразно руководствоваться рекомендациями стандартов ГОСТ Р / МЭК 61508-1,2-2012 [2, 3], ГОСТ ИЕС 61508-3-2018 [4], ГОСТ Р / МЭК 62279-2016 [10] и широко применять *технологические методы подтверждения соответствия требованиям ФБ*.

Оценка достигнутого уровня полноты безопасности (УПБ) для каждой функции безопасности аппаратных средств ИСУ возможна на основе рекомендации п. 7.4 ГОСТ Р / МЭК 61508-2-2012.

Оценка меры примененных методов и средств по управлению отказами производится с помощью рекомендаций стандартов ГОСТ Р / МЭК 61508-2-2012 в части таблиц А.15–А.17 и ГОСТ Р / МЭК 61508-7-2012 в части приложений А, В.

Оценка примененных методов и средств по предотвращению систематических отказов может производиться в соответствии с приложениями В.1–В.4 стандарта ГОСТ Р / МЭК 61508-2-2012.

В отношении ПО ИСУ в стандарте ГОСТ ИЕС 61508-3-2018 рекомендованы следующие процедуры, относящиеся к технологическим методам подтверждения соответствия:

- оценка примененных методов и средств к спецификации и проектированию ПО для каждого УПБ (приложение А);



Рис. 4. Последовательность действий с помощью эвристических графовых методов

- оценка примененных методов и средств по предотвращению систематических отказов ПО (п. В.7);
- оценка качества интеграции ПО с аппаратными средствами ИСУ (приложения А, В);
- оценка руководства по безопасности ПО (приложение Д)

4. Заключение

Обоснование ФБ ИСУ относится к категории задач исследования систем с неполными и недостаточно достоверными данными, с нечеткой архитектурой самих систем, с функционированием в условиях плохо формализованных воздействий на них. При этом сохраняется необходимость гарантированной оценки соответствия (или несоответствия) системы требованиям по ФБ. Для такой оценки необходимо использовать всю доступную информацию и все имеющиеся возможности для всесторонней оценки состояния ФБ ИСУ с учетом принятых мер при разработке и изготовлении системы. Целесообразно максимально реализовать возможности экспериментальных и экспертных методов, методов имитационного моделирования, аналитических и технологических методов подтверждения соответствия. Вследствие ограниченных возможностей экспериментальных и экспертных методов, а также методов имитационного моделирования, желательно акцентировать усилия на применении технологических и эвристических графовых методах. С их помощью возможно не только с уверенностью оценить состояние ФБ интеллектуальных систем, но и вырабатывать рекомендации по достижению приемлемых уровней безопасности таких систем.

Библиографический список

1. ГОСТ 33432-2015. Безопасность функциональная. Политика, Программа обеспечения безопасности. Доказательство безопасности объектов железнодорожного транспорта. М.: Стандартинформ, 2019. IV, 23 с.
2. ГОСТ Р / МЭК 61508-1-2012. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 1. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2014. V, 52 с.
3. ГОСТ Р МЭК 61508-2-2012. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 2. Требования к системам. М.: Стандартинформ, 2014. IV, 80 с.
4. ГОСТ ИЕС 61508-3-2018. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 3. Требования к программному обеспечению. М.: Стандартинформ, 2018. V, 107 с.
5. Santur Y. Random forest based diagnosis approach for rail fault inspection in railways / Santur Y., Karakose M.,

Akin E. // National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering. 2016. Pp. 714-719.

6. Famurewa S.M. Maintenance analytics for railway infrastructure decision support / Famurewa S.M., Zhang L., Asplund M. // Journal Qual. Maint. Eng. 2017. Vol. 23. Pp. 310–325.

7. Nakhaee M.C. The Recent Applications of Machine Learning in Rail Track Maintenance: A Survey / Nakhaee M.C., Hiemstra D., Stoelinga M., van Noort M. // Lecture Notes in Computer Science. 2019. Pp. 91–105.

8. Шубинский И.Б., Замышляев А.М., Проневич О.Б. и др. Применение методов машинного обучения для прогнозирования опасных отказов объектов железнодорожного пути // Надежность. 2020. № 20(2). С. 43-53.

9. СТО РЖД 1-19.009-2009. Системы и устройства железнодорожной автоматики и телемеханики Доказательство безопасности.

10. ГОСТ Р /МЭК 62279-2016 Железные дороги. Системы связи, сигнализации и обработки данных. Программное обеспечение систем управления и защиты на железных дорогах. М.: Стандартинформ, 2017. V, 95 с.

11. Braband J, Shabe H. Risk analysis for automated driving – validation and findings // Signal+ Draht. 2023. Vol. 115(4).

12. Шубинский И.Б. Надежные отказоустойчивые информационные системы. Методы синтеза. М.: «Журнал Надежность», 2016. 546 с, ил.

13. Розенберг Е.Н. Многоуровневая система управления и обеспечения безопасности движения поездов : Дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.06, 05.22.08 : Москва, 2004. 317 с.

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

15. Шубинский И.Б., Розенберг Е.Н. Функциональная безопасность систем управления на железнодорожном транспорте. Вологда: «Инфра-Инженерия», 2023, 360 с.

16. Шубинский И.Б., Шебе Х., Розенберг Е.Н. О функциональной безопасности сложной технической системы управления с цифровыми двойниками // Надежность. 2021. № 1. С. 38-44.

17. Розенберг Е.Н., Ольшанский А.М., Озеров А.В., Сафронов Р.А. Об использовании методов Big Data в области обеспечения функциональной безопасности // Надежность. 2022. № 22(2). С. 38-46.

18. Шубинский И.Б., Шебе Х., Розенберг Е.Н. К оценке безопасности системы автоведения поездов // Надежность. 2021. № 21(4). С. 31-37.

19. Шубинский И.Б., Розенберг Е.Н., Коровин А.С. и др. О методе обеспечения функциональной безопасности системы с одноканальной обработкой информации // Надежность. 2022. № 22(3). С. 44-52.

20. Шубинский И.Б., Розенберг Е.Н., Панферов И.А. и др. Оценка безопасности и бесперебойности работы системы управления маневровым локомотивом с техническим зрением // Надежность. 2023. № 23(1). С. 30-37.

References

1. GOST 33432-2015. Functional safety. Policy and programme of safety provision. Safety proof of the railway objects. Moscow: Standartinform; 2019. (in Russ.)
2. GOST R / IEC 61508-1-2012. Functional safety of electrical, electronic, programmable electronic safety-related systems. Part 1. General requirements. Moscow: Standartinform; 2014. (in Russ.)
3. GOST R / IEC 61508-2-2012. Functional safety of electrical, electronic, programmable electronic safety-related systems. Part 2. Requirements for electrical, electronic, programmable electronic safety-related systems. Moscow: Standartinform; 2014. (in Russ.)
4. GOST IEC 61508-3-2018. Functional safety of electrical, electronic, programmable electronic safety-related systems. Part 3. Software requirements. Moscow: Standartinform; 2018. (in Russ.)
5. Santur Y., Karakose M., Akin E. Random forest based diagnosis approach for rail fault inspection in railways. In: Proceedings of the National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering; 2016. Pp. 714-719.
6. Famurewa S.M., Zhang L., Asplund M. Maintenance analytics for railway infrastructure decision support. *Journal Qual. Maint. Eng.* 2017;23:310–325.
7. Nakhaee M.C., Hiemstra D., Stoelinga M., van Noort M. The Recent Applications of Machine Learning in Rail Track Maintenance: A Survey. *Lecture Notes in Computer Science* 2019. Pp. 91–105.
8. Shubinsky I.B., Zamyshliaev A.M., Pronevich O.B. et al Application of machine learning methods for predicting hazardous failures of railway track assets. *Dependability* 2020;2:45-53.
9. STO RZD 1-19.009-2009. [Railway automation systems and devices. Safety case]. (in Russ.)
10. GOST R / IEC 62279-2016. [Railways. Communications, signalling and data processing systems]. Moscow: Standartinform; 2017. (in Russ.)
11. Braband J., Shäbe H. Risk analysis for automated driving – validation and findings. *Signal+Dracht* 2023;115(4):6-12.
12. Shubinsky I.B. [Dependable failsafe information systems. Synthesis methods]. Moscow: Dependability Journal; 2016. (in Russ.)
13. Rozenberg E.N. [Multi-level train control and protection system: Doctor of Engineering thesis]. 05.13.06, 05.22.08. Moscow; 2004. (in Russ.)
14. Shubinsky I.B. [Structural dependability of information systems. Analysis methods]. Moscow: Dependability Journal; 2012. (in Russ.)
15. Shubinsky I.B., Rozenberg E.N. [Functional safety of control systems in railway transportation]. Vologda: Infra-Inzheneria; 2023. (in Russ.)

16. Shubinsky I.B., Schäbe H., Rozenberg E.N. On the functional safety of a complex technical control system with digital twins. *Dependability* 2021;1:38-44.

17. Rozenberg E.N., Olshansky A.M., Ozerov A.V., Safronov R.A. Big data based methods for proof of functional safety. *Dependability* 2022;22(2):38-46.

18. Shubinsky I.B., Shäbe H., Rozenberg E.N. On the safety assessment of an automatic train operation system. *Dependability* 2021;21(4):31-37.

19. Shubinsky I.B., Rozenberg E.N., Korovin A.S. et al. On a method for ensuring functional safety of a system with single-channel information processing. *Dependability* 2022;22(3):44-52.

20. Shubinsky I.B., Rozenberg E.N., Panfiorov I.A. et al. Estimating the safety and reliability of the control system of a locomotive with machine vision. *Dependability* 2023;23(1):30-37.

Сведения об авторах

Шубинский Игорь Борисович – профессор, доктор технических наук, заместитель руководителя НТК АО «НИИАС», Москва, Российская Федерация, e-mail: igor-shubinsky@yandex.ru

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

About the authors

Igor B. Shubinsky, Professor, Doctor of Engineering, Deputy Director of Integrated Research and Development Unit, JSC NIIAS, Moscow, Russian Federation, e-mail: igor-shubinsky@yandex.ru.

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

Вклад авторов

Шубинский И.Б. – разработка эвристического графового полумарковского метода и порядка его практического применения в сочетании с технологическим методом оценки уровня полноты безопасности системы.

Розенберг Е.Н. – постановка задачи обоснования функциональной безопасности интеллектуальных систем управления и оценка ограничений в применении для этих целей статистических, экспертных методов, а также методов имитационного моделирования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Актуальные вопросы стандартизации терминологии управления рисками на железнодорожном транспорте

Relevant matters of standardisation of the terminology in risk management in railway transportation

Бубликова М.А.¹, Сазонов А.П.^{1*}

Bublikova M.A.¹, Sazonov A.P.^{1*}

¹ АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), Москва, Российская Федерация

¹ Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation (JSC NIIS), Moscow, Russian Federation

*a.sazonov@vniias.ru



Бубликова М.А.



Сазонов А.П.

Резюме. В преддверии пересмотра одного из базовых стандартов, устанавливающего подход и общие правила управления рисками на железнодорожном транспорте, связанными с безопасностью функционирования объектов инфраструктуры и подвижного состава – ГОСТ 33433-2015 «Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте» – возникла необходимость в уточнении понятийного аппарата в области оценки и обработки рисков, связанных с функционированием железнодорожного транспорта, как технической системы. Целью настоящей статьи является сравнительный анализ ключевых понятий и их определений в управлении рисками, вошедших в практику использования в национальных стандартах и нормативной документации в Российской Федерации. Риски, являющиеся следствием влияния различных неопределенностей на достижение целей, выступают в качестве качественной или количественной оценки возникающих в процессе функционирования технических систем угроз. Отсутствие единого определения риска и общепринятой концепции управления риском затрудняет внедрение принципов риск-ориентированного подхода в управление компаниями и порождает конфликты и непонимание между разными уровнями управления и ответственности. В статье на примере анализа нормативного обеспечения управления рисками на железнодорожном транспорте обсуждается необходимость взаимной согласованности существующих нормативных документов и руководств, регламентирующих процесс управления рисками на корпоративном уровне управления в рамках единой концепции для обеспечения единства понимания смыслового и практического наполнения используемых терминов и понятий. Затронуты вопросы определения базового понятия «риск». Обсуждаются вопросы гармонизации подходов и терминологии российских и зарубежных стандартов управления рисками.

Abstract. In advance of the revision of GOST 33433-2015. Functional safety. Risk management on railway transport, a basic standard that defines the approach and general rules for managing risks in railway transportation that are associated with the functional safety of infrastructure facilities and rolling stock, it is imperative that we refine the definitions in the area of assessment and handling of risks associated with the operation of railway transportation as a technical system. This paper aims to conduct a comparative analysis of the key notions and their definitions as applied to risk management that have become part of national standards and regulatory documents in the Russian Federation. The risks that arise from the effects of various uncertainties on the achievement of the specified goals serve as a qualitative and quantitative estimation of the threats that manifest themselves in the process of technical systems operation. The absence of a single definition of risk and generally accepted concept of risk management complicates the introduction of the risk-oriented principles in business management and causes conflicts and misunderstanding between different levels of management and responsibility. Using the example of an analysis of regulatory support of risk management in railway transportation, the paper discusses the requirement of mutual coordination of the existing regulatory documents and guidelines that regulate the corporate risk management process as part of a single concept for the purpose of ensuring a single understanding of the conceptual and practical aspects of the used terms and concepts. The authors touch upon the definition of the basic concept of “risk”. They also discuss the harmonisation of the approaches and terminologies used in the Russian and foreign risk management standards.

Ключевые слова: риск, управление риском, безопасность, стандартизация, техническое регулирование.

Keywords: risk, risk management, safety, standardisation, technical regulation.

Для цитирования: Бубликова М.А., Сазонов А.П. Актуальные вопросы стандартизации терминологии управления рисками на железнодорожном транспорте // Надежность. 2023. №3. С. 46-62. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-3-46-62>

For citation: Bublikova M.A., Sazonov A.P. Relevant matters of standardisation of the terminology in risk management in railway transportation. Dependability 2023;3:46-62. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-3-46-62>

Поступила: 10.04.2023 / **После доработки:** 27.06.2023 / **К печати:** 15.09.2023

Received on: 10.04.2023 / **Revised on:** 27.06.2023 / **For printing:** 15.09.2023

Введение

Любая наука основывается на ряде принятых в общеизвестном смысле аксиом, теорий и понятий. В геометрии, например, это могут быть, понятия точки, прямой линии, фигуры; в механике – силы, массы, скорости. Например, одним из основных понятий, являющихся предметом рассмотрения в теории вероятностей, является «случайное событие». Говорят, что событие называется случайным, если оно может произойти, а может и не произойти [1]. Вероятность является не только количественной мерой возможности наступления события, но и количественной мерой степени его случайности. Понятия «возможность», «случайность», «вероятность» находятся в определенном отношении с понятием «неопределенность». Случайные события и неопределенности сопутствуют любому виду деятельности, переводя объективно существующие опасности в угрозы, оценкой которых является риск.

Железнодорожный транспорт в России представляет собой сложную технологическую систему. Различные хозяйства железнодорожного транспорта образуют целую и единую систему, направленную на обеспечение перевозки грузов и пассажиров. Эффективность работы железных дорог полностью зависит от эффективности работы всех хозяйств. Поэтому вся работа железнодорожного транспорта рассматривается как совокупность взаимосвязанных процессов.

Система управления рисками интегрируется в общую систему управления, что подразумевает рассмотрение вопросов управления рисками при принятии решений по любым функциональным направлениям деятельности. Принятие решений, в свою очередь, основывается на тщательном анализе информации и всесторонней оценке влияния этого решения на различные аспекты работы этой отрасли.

Однако терминологические различия в трактовке понятия «риск» в документах, регулирующих разные уровни управления железнодорожным транспортом, существенно осложняют взаимодействие между ответственными структурными подразделениями. Поэтому терминология управления рисками должна подразумевать четкий и логически выстроенный процесс. Управление рисками связано как с ценностями в самом общем понимании, так и с ценностью в более узком, материальном понимании. Здесь необходим единый подход толкования одинаковых понятий и терминов. Понимая важность обозначенной проблемы, авторы статьи делают первый шаг, чтобы разобраться в причинах возникающих расхождений.

О концептуализации понятия «риск»

Главной проблемой технического регулирования рисков является отсутствие у научного сообщества единого понимания понятия «риск». Дело в том, что если риск – это мера для оценки события, то она должна характеризоваться вероятностью возникновения в определенном месте в определенный момент времени и ожидаемыми последствиями (ущербом). Такой подход справедлив в теории надежности и системах массового обслуживания, страхования, где события отказа происходят достаточно часто и при однородном прогнозном фоне.

Современные прогностические модели, построенные на параметрах случайности влияния учитываемых предпосылок «среднестатистического» типа, без учета вероятности значительных отклонений приводят не к снижению, а к накоплению рискованных ситуаций и неэффективному управлению рисками.

В реальной жизни не наблюдаются вероятностные распределения. Наблюдаются события. Поэтому, как правило, отсутствует информация о статистических параметрах – до тех пор, пока событие не произошло. Если взять ряд наблюдений, одним и тем же результатам может соответствовать множество статистических распределений, но каждое будет по-разному экстраполироваться вне того набора фактов, из которого оно выведено. Эта проблема реконструкции встает тем острее, чем большее количество теорий и распределений удастся «подверстать» под тот или иной набор данных, – особенно когда имеются нелинейные эффекты или неэкономное распределение. Гауссово распределение является экономным (так как определяется всего двумя параметрами). Однако добавление уровней возможных скачков, со своей вероятностью для каждого, открывает бесконечную перспективу для комбинирования параметров. Катастрофические события в статистику, как правило, не попадают, стало быть, основанные на подобных данных распределения заставляют наблюдателя переоценивать стабильность и недооценивать потенциальный риск и волатильность.

История формирования понятия «риск» в значительной степени связана с отношением человека к будущему [2]. Риск связан со множеством условий и факторов, влияющих на исход (положительный или отрицательный) принимаемых людьми решений. Риск недостижения намеченных результатов начал особенно проявляться в условиях глобализации современной экономики, когда действия одних субъектов увеличивают неопре-

деленность принятия решений для других. Достаточно широкую и одновременно конструктивную трактовку риска начали использовать в страховании, поскольку данная сфера деятельности непосредственно связана с существованием и различными формами проявления риска. Кроме того, страховые события имеют высокую повторяемость, что необходимо для применения к анализу страховых случаев хорошо разработанного аппарата теории вероятностей и математической статистики. Именно благодаря страхованию сформировалось понимание риска как экономической категории [3].

Окончательные понимания природы риска сформировались только в последней четверти XX века благодаря практическим потребностям обеспечения безопасности в техносфере и стабильности общественного воспроизводства в экономике [4–6].

Представления о риске менялись с течением времени. В работе [7] тщательно проанализированы последовательные изменения в понимании риска, результатом которых стало наиболее общее его определение в ISO 31000 «Менеджмент риска – Руководство» как следствия влияния неопределенностей на достижение целей деятельности. Автор упомянутой работы приводит и рассматривает девять основных подходов к определению риска:

1. Риск = Ожидаемая стоимость (убыток) ($R=E$):

а. Риск потери суммы является обратной величиной по отношению к ожиданиям, а истинная мера риска – это произведение суммы авантюры, умноженное на вероятность потери;

б. Риск равен ожидаемой потере;

с. Риск равен произведению вероятности и полезности некоторого будущего события;

д. Риск равен ожидаемой бесполезности;

2. Риск = Вероятность (нежелательного) события ($R=P$):

а. Риск – это вероятность повреждения или потери;

б. Риск равен вероятности нежелательного события;

с. Риск означает вероятность наступления последствий, вызванных определенной опасностью, возникающей в течение определенного периода времени и в определенных обстоятельствах;

3. Риск = Объективная неопределенность ($R=OU$):

а. Риск – это объективный коррелят субъективной неопределенности; неопределенность рассматривается как воплощенная в ходе событий во внешнем мире;

б. Риск – это измеримая неопределенность, т.е. неопределенность, при которой распределение исхода в различных обстоятельствах известно (либо путем расчета априори, либо из статистики прошлого опыта);

4. Риск = Неопределенность ($R=U$):

а. в отношении затрат, потерь и ущерба;

б. в отношении потерь;

с. о наступлении неблагоприятной ситуации;

д. о результатах, действиях и событиях.

5. Риск = потенциал/возможность потери ($R=PO$):

а. Риск – возможность неблагоприятного события;

б. Риск – возможность неблагоприятного отклонения от ожиданий;

с. Риск – потенциал реализации нежелательных, негативных последствий события;

6. Риск = Вероятность и сценарии/последствия/тяжесть последствий ($R=P\&C$):

а. Риск – это комбинация опасностей, измеренных вероятностью; скорее состояние мира, чем состояние разума;

б. Риск – это мера вероятности и серьезности негативных последствий;

с. Риск – это триплет (s_i, p_i, c_i) , где s_i – первый сценарий, p_i – вероятность этого сценария, а c_i – последствия этого сценария, $i = 1, 2, \dots, N$; т.е. риск фиксирует: что может произойти? Насколько вероятно, что это произойдет? Если это произойдет, каковы будут последствия?;

д. Риск – это сочетание вероятности и экстенсивности последствий;

7. Риск = Событие или последствие ($R=C$):

а. Риск – это ситуация, когда что-то, имеющее человеческое значение (включая самого человека), находится под угрозой, и когда исход не определен;

б. Риск – это неопределенное последствие какого-либо события или действия в отношении чего-либо, имеющего человеческую ценность;

8. Риск = Последствия/повреждения/тяжесть этих последствий и неопределенность ($R=C\&U$):

а. Риск=Неопределенность и повреждение;

б. Риск – это двухмерная комбинация событий/последствий (какой-либо деятельности) и связанных с ними неопределенностей;

с. Риск – это неопределенность и серьезность последствий (или результатов) какой-либо деятельности по отношению к чему-либо, что имеет ценность для человека;

д. Риск – это отклонения от уровня ориентиров (идеальных состояний, запланированных значений, ожидаемых значений, целей) и связанные с ними неопределенности;

9. Риск – это влияние неопределенности на цели ($R=ISO$).

Эволюция вышеприведенных подходов с течением времени привела к формированию шести основных концепций риска (рис. 1).

Устойчивое функционирование технической системы при различных внешних и внутренних факторах воздействия характеризуется ее надежностью, а степень правильности выбранного решения по управлению параметрами технической системы – риском руководителя, ответственного за принимаемое решение. Поэтому большинство управленческих решений принимаются в условиях риска. В подобных условиях возникает неопределенность в получении ожидаемого конечного результата, таким образом, возрастает возможность появления дополнительных затрат и потерь. Все это находит свое отражение в толковании слова «риск» [5].

Понятия «надежность», «безопасность», «опасность» и «риск» часто смешивают, при этом их значения перекрываются. Наряду с понятием «анализ надежности»

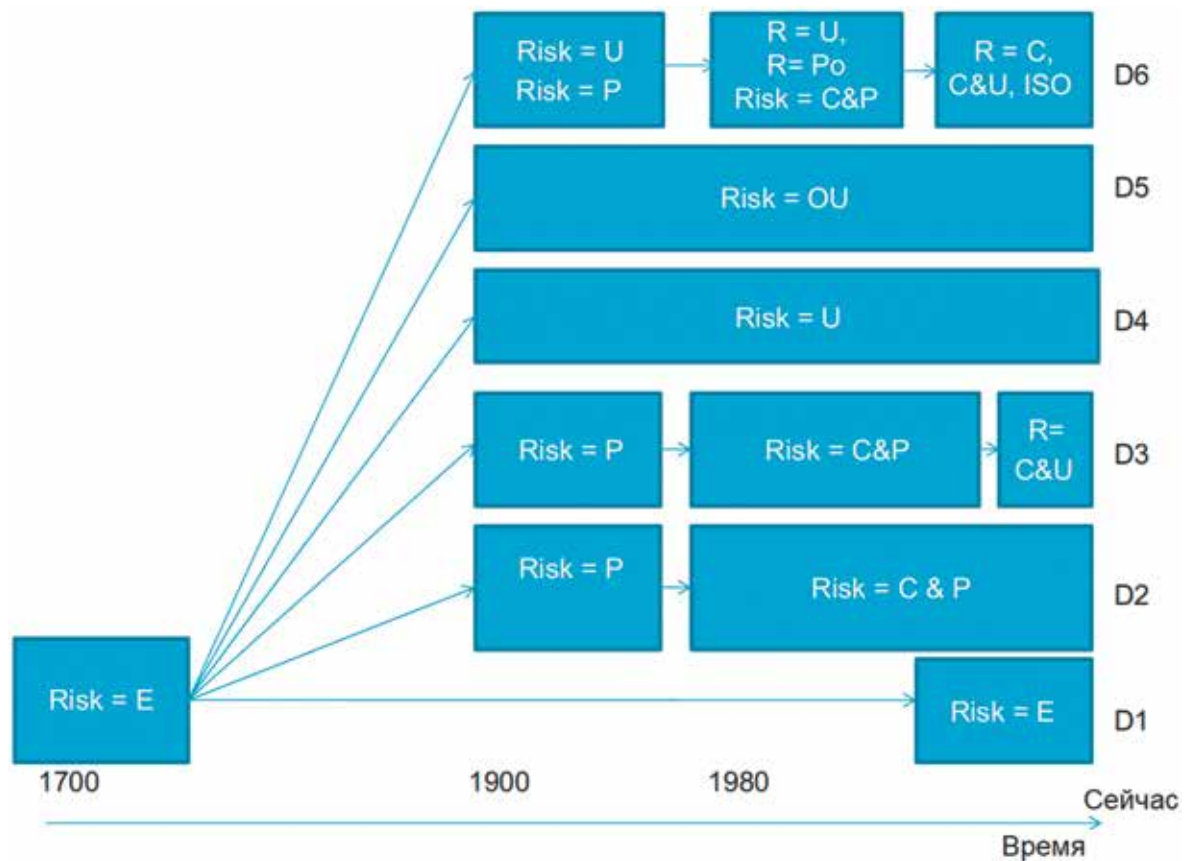


Рис. 1. Эволюция концепций риска с течением времени [7]

они относятся к исследованию как работоспособности, отказов технических систем и оборудования, потери работоспособности, так и процесса их возникновения. Так, если при анализе безопасности предполагается возможность отказов в системе, то проводится анализ риска для того, чтобы определить последствия отказов в смысле ущерба, наносимого технической системе и последствий для людей, находящихся в непосредственной близости с ней [8].

К сожалению, пока не приходится говорить о существовании единого, общепризнанного, универсального определения риска. Каждый исследователь выбирает или дает то определение, которое наиболее удачно, на его взгляд, выделяет наиболее значимые в изучаемом контексте стороны риска. Самое краткое, и в то же время емкое определение риска может быть сформулировано следующим образом: «риск – это неопределенность потерь» [9].

Технические системы – системы целеустремленные, т.е. цели технических систем задаются извне. Системы управления технических систем не должны формировать и не формируют цели управляемой системы. Поэтому приведенное выше определение достаточно, для определения системы управления техническими системами.

Деятельность, направленная на получение некоторого результата, то есть целенаправленная деятельность, предполагает наличие внешних и внутренних обстоятельств, влияющих на степень отличия достигнутого

результата от планируемого. Знание о внешних и внутренних обстоятельствах в каждый момент деятельности имеет ту или иную степень полноты и определенности. Неопределенности, влияющие на достижение запланированной цели, определяют риск. Шанс и риск составляют полную группу событий, то есть в результате целенаправленной деятельности обязательно реализуется одно из них. Поскольку из теории вероятностей известно, что сумма вероятностей в полной группе событий равна 1, зная риск, можно оценить и шанс достижения цели.

Одним из ключевых изменений, предложенных в ISO 31000, стала концептуализация понятия риска. В соответствии с ISO термин «риск» означает не «шанс или вероятность потерь», а «влияние неопределенности на цели». Влияние – это отклонение от того, что ожидается. Оно может быть положительным и/или отрицательным, и может способствовать реализации возможностей и устранению угроз, создавать или приводить к возникновению возможностей и угроз. Цели могут иметь различные аспекты и категории и могут применяться на различных уровнях. Таким образом, постулировано, что риск объекта (процесса) – это величина, пропорциональная отклонению от эталона качества объекта (процесса). Из этого следует, что качество объектов и риск можно измерять в сопоставимых шкалах. Мера риска – «угроза изменения состава или свойств объекта или окружающей его среды, либо появление изменений связанных с возникновением нежелательных процес-

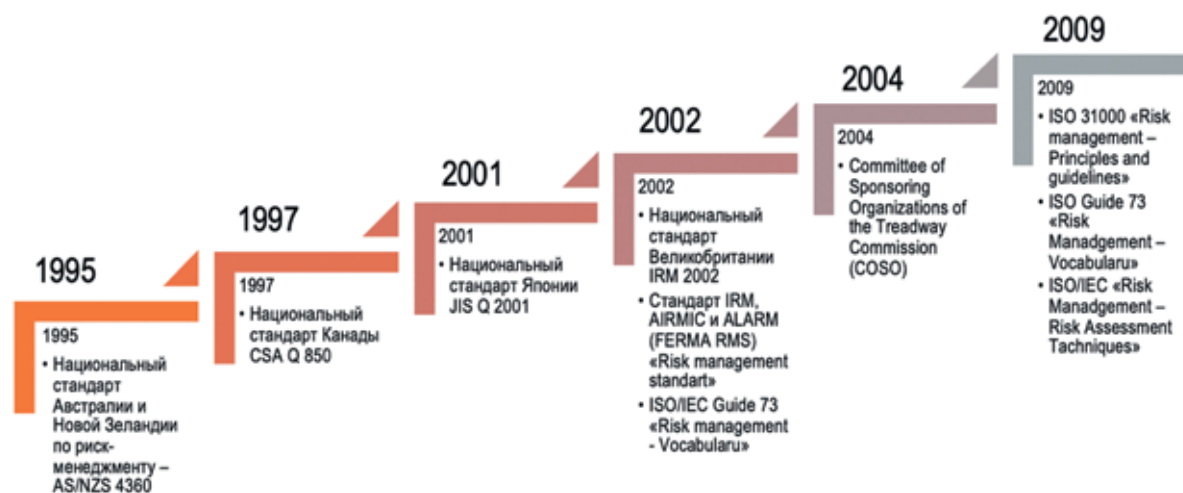


Рис. 2. Развитие стандартов по риск-менеджменту

сов, обусловленных антропогенным или природным воздействием»¹.

Развитие стандартизации процесса управления рисками

Многолетние исследования привели к формированию несколько базовых концепций (FERMA, COSO, ISO). Эти концепции не противоречат друг другу, однако имеют различия. По «старшинству» и универсальности за основу целесообразно, на наш взгляд, принять формулировку ISO 31000, как вводящую наиболее общее определение понятия «риск». Определения, использованные ранее, так или иначе вписываются в определение ISO 31000 (последнее содержит пять примечаний, раскрывающих и поясняющих его смысл).

Несмотря на разницу в подходах, стилистике и в объеме упомянутых документов, каждый из данных стандартов придерживается определения, что риск – это влияние неопределенности на достижение поставленных целей.

FERMA отталкивается от стратегических целей. Далее происходит анализ рисков (идентификация и описание рисков), оценка рисков и принятие решения об их обработке.

COSO ERM рассматривает четыре категории бизнес-целей (стратегические, операционные, цели подготовки отчетности, цели соблюдения законодательства или комплаенс²) и выстраивание системы управления рисками для достижения этих целей. В 2017 году COSO отказался от прежней концепции («магический куб» в COSO больше не упоминается) и делает акцент на интеграцию процесса риск-менеджмента в существующие процессы.

ISO 31000, единственный из вышеперечисленных стандартов, имеющий статус международного, представляет, по сути, концептуальную основу целого семейства стандартов, включающее непосредственно стандарт

ISO 31000:2018 «Управление рисками. Руководство», IEC 31010:2019 «Управление рисками. Методы оценки рисков», где отражены более 30 формализованных методов, а также ISO Guide 73:2009 «Управление рисками. Словарь», содержащий ключевые термины и определения. К этому же семейству относится и ISO 31004:2013 «Управление рисками. Руководство по внедрению».

Хронология развития стандартов в области управления рисками представлена на рис. 2. Более подробный обзор международных стандартов в области управления рисками и описание концепций, на которые они опираются – в [7], [10].

Обобщенный процесс управления рисками трех стандартов – COSO, FERMA и ISO 31000 с небольшими отличиями включает обязательную последовательность этапов: установление контекста компании, определение целей, процессов и KPI³, идентификация, анализ, оценивание и обработка рисков (рис. 3 и 4).

Отечественный подход в области управления рисками формировался путем заимствования международного опыта. Так, ГОСТ Р ИСО 31000-2019 «Менеджмент риска. Принципы и руководство» – прямой аналог ISO 31000, ГОСТ Р 51897-2022 (Руководство ISO/IEC 73:2009) «Менеджмент риска. Термины и определения» – является идентичным международному документу ISO Guide 73:2009 «Менеджмент риска. Словарь», ГОСТ Р 58771-2019 «Менеджмент риска. Технологии оценки риска» и ГОСТ Р МЭК 31010-2021 «Надежность в технике. Методы оценки риска» – модифицированные российские аналоги МЭК 31010:2019 «Управление рисками – Методы оценки рисков». Своего стандарта по комплексному управлению рисками в нашей стране пока не создано.

Во всех стандартах по управлению рисками в большей или меньшей степени заложен комплексный подход к управлению рисками, а этап оценки рисков выделен отдельно, и следует за (либо сочетается с) этапом идентификации рисков.

¹ При этом смысл этого определения – вероятностный.

² В переводе с англ. compliance – соблюдение соответствия.

³ В переводе с англ. key performance indicators – ключевые показатели эффективности.

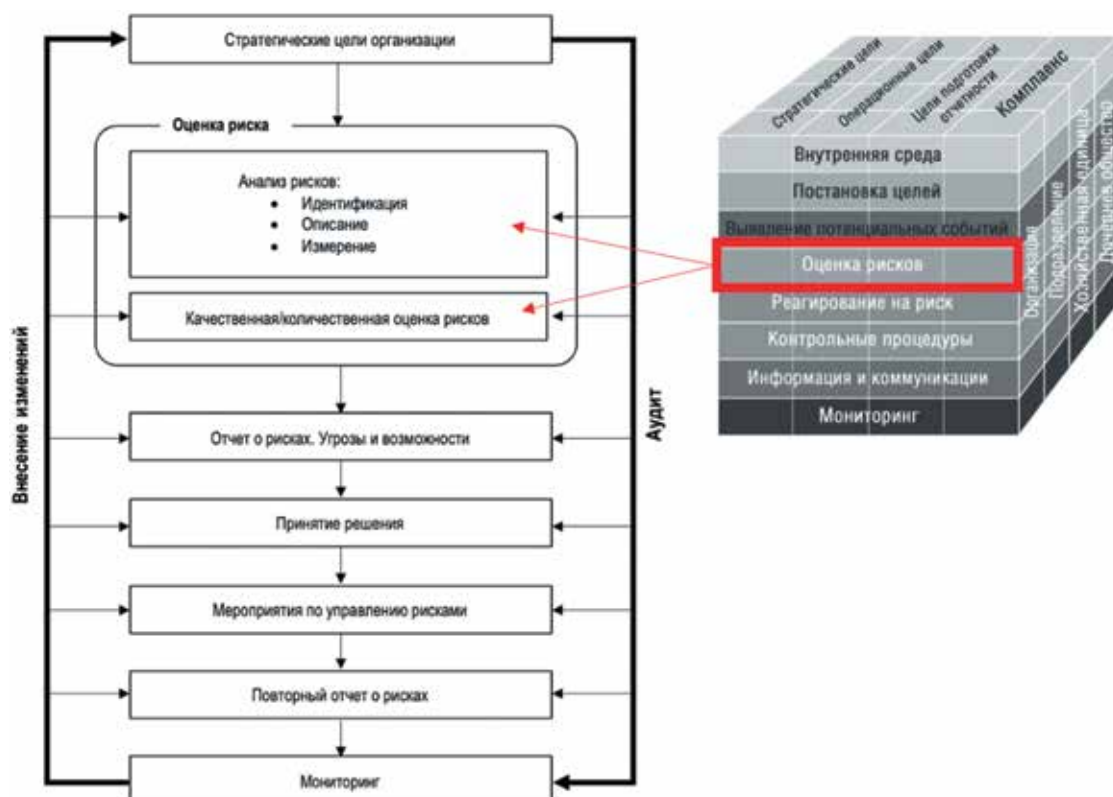


Рис. 3. Процесс управления рисками в стандарте FERMA и его пересечение с концепцией управления рисками COSO ERM

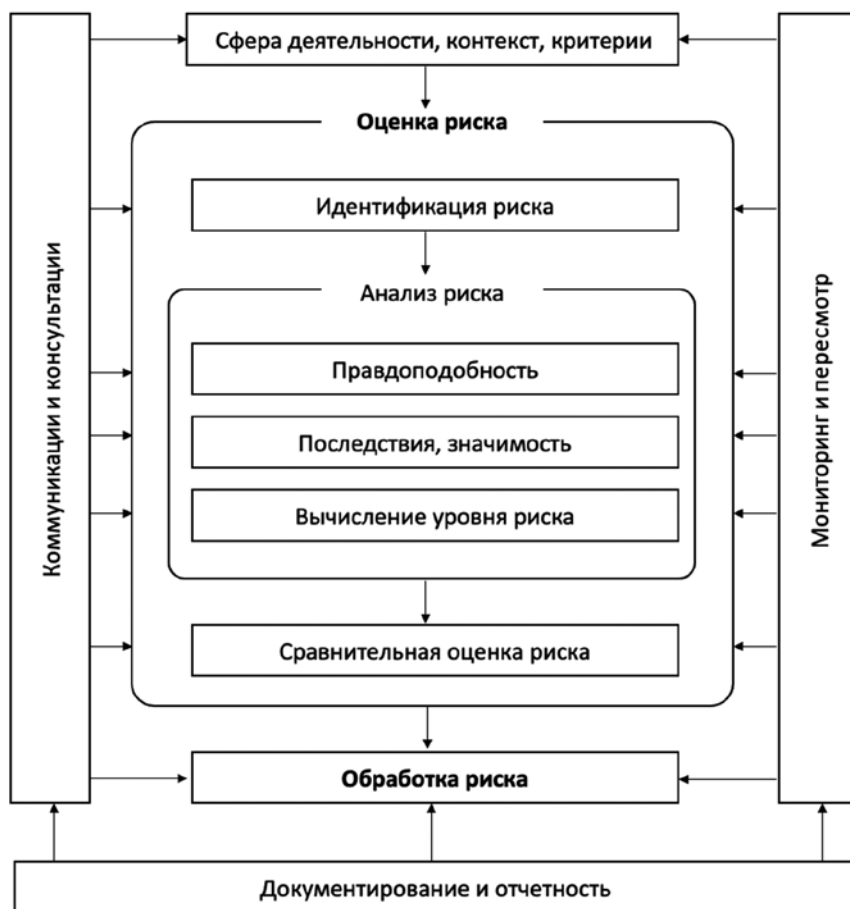


Рис. 4. Процесс управления рисками в стандарте ISO 31000

Трудность оценки возникает из-за того, что более-менее легко «измеримые» в стоимостном выражении финансовые риски для нефинансовых компаний составляют, как правило, лишь небольшую часть. Важна не точность оценки этих рисков, а их выявление, учет и контроль.

Следует также отметить, что в англоязычных стандартах и методиках по управлению рисками используются разные термины: «risk assessment», «risk estimation» и «risk evaluation», подразумевая различные задачи и степень анализа рисков, в переводе же на русский язык эти «тонкости» часто теряются под одним термином «оценка риска». Эта оценка не сводится к их «измерению», а представляет собой совокупность процедур анализа как самих рисков, включающих определение их характеристик (объектов риска, факторов риска с учетом их взаимодействия, возможных последствий), так и подверженности организации рискам с учетом их взаимного влияния. Такая структура оценки хорошо отражена, например, в стандарте FERMA.

В России, так же, как и в других странах, наибольший опыт накоплен в оценке имущественных рисков в страховании и рыночных/финансовых рисков в банковском секторе (тем более что этого требуют регуляторы), а технологии управления во многом заимствуются из международной практики. Как следствие именно в этих областях управления началось активная стандартизация и нормотворчество. Появление концепции единой системы управления рисками и внутреннего контроля способствовало внедрению в вертикально интегрированных технических компаниях в России в качестве документов верхнего уровня управления, регламентирующих политику и процедуру управления рисками компании (Политики, Концепции системы управления рисками и внутреннего контроля (СУРиБК)) документов, разработанных на базе концепции COSO. Пример процесса управления рисками представлен на рис. 5.

По определению, данному Институтом Внутренних аудиторов (США), «контролем является всякое действие, предпринятое органом управления для повышения вероятности того, что установленные цели будут достигнуты». То есть контроль, как и риск, определяется через цели организации. И если риск представляет угрозу этим целям, меру отклонения от них, то контроль предназначен смягчить эту угрозу.

Общепринятой формулой является присущий **риск – контроль = остаточный риск**. Уровень остаточного риска сравнивается с оптимальным уровнем. Уровень остаточного риска выше оптимального является неприемлемым. Уровень остаточного риска ниже оптимального соответствуют избыточному контролю. Суждения об оптимальности уровня остаточного риска субъективны. На основании результатов оценки уровня остаточного риска ответственное лицо может решить либо скорректировать цели, либо изменить (усилить или ослабить) систему контроля, либо продолжать развитие.

Международно-признанными методологическими основами организации внутреннего контроля и управ-

ления рисками являются разработанные международной организацией по стандартизации ISO и неправительственной организацией COSO концептуальные документы, на которых базируются профильные разработки таких международных институтов, как Организация экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), Институт внутренних аудиторов (ИВА), Группа разработки финансовых мер борьбы с отмыванием денег (ФАТФ), Базельский комитет по банковскому надзору.

Внутренний контроль представлен как составная часть управления рисками организации, а управление рисками является частью более общего процесса управления организацией. Управление рисками рассматривается как относящееся в большей степени к будущему, на уровне выявления того, какие риски организация готова принять, каким образом риски формируются и уменьшаются при осуществлении стратегических целей, и того, как появляющиеся риски могут повлиять на организацию. Внутренний же контроль фокусируется на том, как организация влияет на риски для достижения своих целей в текущий период ее деятельности. Система внутреннего контроля (ВК) и система управления рисками (УР) строятся из взаимосвязанных компонентов, которые являются необходимыми инструментами для достижения целей и действуют в составе единого комплекса мер.

В целом, стандарты, связанные с вопросами управления рисками, условно можно разделить на две большие группы.

Стандарты первой группы – так называемые «прикладные» стандарты – рассматривают риск как характеристику безопасности различных технических систем (машин и оборудования). К данной группе в основном относятся стандарты, разработанные Международной электротехнической комиссией (МЭК), Международной организацией по стандартизации (ИСО) в области безопасности различных видов продукции и их национальные аналоги, и производные документы.

Эти стандарты определяют риск как «сочетание вероятности нанесения ущерба и тяжести этого ущерба», то есть риск является мерой (величиной) для оценки реализации каких-либо опасных событий, связанных с применением технической системы, и имеет негативный смысл, так как речь идет именно об ущербе (физическом повреждении или вреде, причиняемом здоровью людей, имуществу или окружающей среде).

Как следствие, управление рисками функционирования технических систем фокусируется на определении и реализации различных мер на стадиях жизненного цикла системы, направленных на снижение риска за счет уменьшения вероятности реализации опасностей и/или величины возможного ущерба.

Для железнодорожного транспорта широкое распространение получила система RAMS – это методология обеспечения безотказности (Reliability), готовности (Availability), ремонтпригодности (Maintainability) и безопасности (Safety) на железнодорожном транспорте,



Рис. 5. Типовая схема процессов СУРиБК

получившая развитие с 90-х годов прошлого века и формализованная серией стандартов EN 50126 / IEC 62278, EN 50128 / IEC 62279, EN 50129 / IEC 62425Ed, EN 50159 / IEC 62280.

Ввиду того, что RAMS направлена на производителей технических средств, которые ориентированы в основном на эксплуатационную деятельность и, соответственно, на эксплуатационную надежность, она не в полном объеме удовлетворяла устоявшимся в отечественной практике подходам. В настоящее время существуют два подхода к пониманию эксплуатационной надежности технических систем. Наиболее распространенный подход заключается в проектировании и поддержании надежности в процессе эксплуатации технических систем. При этом подходе, как правило, исследуются показатели надежности как функции времени, а термин «наработка» подразумевает время работы. При втором подходе «наработка» рассматривается как некий результат производственной деятельности объекта, выраженный в объемах выполненной работы. Для российских железных дорог второй подход имеет приоритетное значение, он потребовал разработки системы показателей эксплуатационной надежности, учитывающих характер деятельности отдельных хозяйств и увязанных с объемами выполняемой ими эксплуатационной работы.

Кроме того, методология RAMS разработана на уровне отдельных объектов и не затрагивает процессы надежного и безопасного управления активами предприятий в соответствии с требованиями стандартов управления активами ГОСТ Р 55.0.01-2014/ИСО 55000:2014 «Управление активами. Национальная система стандартов. Общее представление, принципы и терминология». При функционировании железнодорожного транспорта задействуется большое количество людей – от пассажиров, обслуживающего персонала, персонала, ответственного за работу оборудования, до других участников движения, например водителей автомобилей на железнодорожных переездах. Каждый из них может среагировать на какую-либо ситуацию по-разному. Поскольку человек может оказать большое влияние на RAMS, достижение заданных показателей RAMS железнодорожной техники требует более строгого учета человеческого фактора, чем это требуется в других отраслях.

Средства достижения соответствия показателей RAMS установленным требованиям предусматривают управление факторами, влияющими на RAMS в течение всего жизненного цикла системы. Эффективное управление требует создания технологий защиты от источников отказов и ошибок, возникающих при

использовании и обслуживании системы с учетом как случайных, так и систематических отказов. При этом предусматриваются меры по уменьшению возможного ущерба, возникающего в результате отказов и ошибок на всех стадиях жизненного цикла, включая сочетание профилактических (направленных на снижение возможного ущерба) и защитных (направленных на снижение тяжести последствий ущерба) мер.

Для практического развития положений указанных стандартов разработаны новые методологические направления для эффективного управления техническим содержанием активов – была создана методология комплексного управления ресурсами, рисками и надежностью на всех стадиях жизненного цикла (УРРАН), включающая в себя комплекс межгосударственных и национальных стандартов, стандартов организации, методик, методических рекомендаций и информационную систему, территориально распределенную на сети железных дорог [11, 12]. Возможное воздействие любого фактора, влияющего на надежность и безопасность функционирования рассматриваемого железнодорожного объекта, оценивается с учетом его критичности для организации перевозочного процесса. Такая оценка предполагает рассмотрение влияния каждого фактора и их взаимосвязь на всех стадиях жизненного цикла активов.

В методологии УРРАН получили развитие многие положения RAMS, в частности:

- переход от комплексного управления надежностью и безопасностью функционирования объекта к комплексному управлению надежностью и безопасностью перевозочного процесса с помощью созданных информационных технологий;
- управление надежностью и безопасностью перевозочного процесса на основе разработанной системы показателей эксплуатационной надежности и функциональной безопасности объектов и процессов;
- управление инвестициями на основе оценки рисков с учетом стоимости жизненного цикла, долговечности и технического обслуживания объектов железнодорожного транспорта по состоянию.

УРРАН обеспечивает комплексное применение модифицированных методологий RAMS и стоимости жизненного цикла, новых информационных технологий поддержки принятия решений (в том числе в условиях неполной информации), территориально распределенных информационных систем оперативного сбора и анализа данных и нормативно-методического обеспечения, которые благодаря совместному применению обеспечивают практическое управление ресурсами, рисками, надежностью и функциональной безопасностью, а также впервые позволяют в условиях дефицита финансовых средств вкладывать инвестиции в наиболее проблемные объекты и продлять назначенный срок службы объектов железнодорожного транспорта до достижения предельного состояния на основе оценки рисков.

Вторую группу составляют так называемые «общекорпоративные» стандарты, рассматривающие принципы

и порядок организации системы управления рисками в компании в целом, а риск – как инструмент менеджмента. К данной группе в основном относятся стандарты ИСО серии «Менеджмент риска», стандарты, разработанный Комитетом спонсорских организаций комиссии Тредвея (COSO, США), стандарты Федерации европейских ассоциаций риск-менеджеров (FERMA) и др., а также их национальные аналоги и производные документы.

Основополагающими стандартами второй группы являются Руководство ISO 73:2009 (отечественный аналог – ГОСТ Р 51897-2021 «Менеджмент риска. Термины и определения») и ISO 31000:2018 (соответствующий российский аналог – ГОСТ Р ИСО 31000-2019 «Менеджмент риска. Принципы и руководство»).

Стандарты данной группы:

- содержат подходы и принципы организации управления рисками (менеджмента риска);
- обеспечивают общий подход к управлению рисками любого типа и не являются отраслевыми;
- могут применяться на протяжении всего жизненного цикла организации и использоваться в любой отрасли, при принятии решений на всех уровнях управления.

В данных стандартах термин «риск» означает уже не «вероятность ущерба», а «следствие влияния неопределенности на достижение поставленных целей», т.е. «отклонение от ожидаемого результата или события».

При этом подходы к работе с рисками у рассмотренных групп стандартов в целом схожи и не противоречат друг другу. Процесс управления рисками здесь рассматривается как неотъемлемая часть системы менеджмента организации и принятия решений, который должен быть интегрирован в структуру, операционную деятельность и процессы организации.

В России принята практика уточнять и детализировать положения общего стандарта ГОСТ Р ИСО 31000 для отдельных областей деятельности, например:

- в производственной сфере – ГОСТ Р 58969-2020 «Менеджмент риска. Управление технико-производственными рисками промышленного предприятия»;
- в области управления проектами – ГОСТ Р 58970-2020 «Менеджмент риска. Количественная оценка влияния рисков на стоимость и сроки инвестиционных проектов», ГОСТ Р 52806-2007 «Менеджмент рисков проектов. Общие положения» и ГОСТ Р 56275-2014 «Менеджмент рисков. Руководство по надлежащей практике менеджмента рисков проектов» и др.;
- в сфере новых технологий – серия ГОСТ Р 57272 «Менеджмент риска применения новых технологий» (части 1-7).

В сфере технического регулирования на межгосударственном уровне прежде всего необходимо руководствоваться техническими регламентами Таможенного союза в области железнодорожного транспорта, принятыми Решением Комиссии Таможенного союза от 15 июля 2011 года № 710:

- ТР ТС 001/2011 «О безопасности железнодорожного подвижного состава»;

– ТР ТС 002/2011 «О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта»;

– ТР ТС 003/2011 «О безопасности инфраструктуры железнодорожного транспорта».

Техническими регламентами устанавливаются минимально необходимые требования к продукции железнодорожного назначения, выполнение которых обеспечивает ее безопасность. Эти требования устанавливаются «с учетом степени риска причинения вреда» «жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, а также окружающей среде, жизни или здоровью животных и растений».

Так как требования технических регламентов носят достаточно общий характер, то применяются межгосударственные (иногда и национальные) стандарты, приведенные в перечне стандартов, в результате применения которых обеспечивается соблюдение требований технических регламентов. В случае неприменения стандартов, включенных в такие перечни, оценка соответствия продукции осуществляется на основе оценки рисков.

Первоначально этот посыл также был заложен в Федеральном законе от 27.12.2002 № 184-ФЗ «О техническом регулировании», который положил начало перестройке систем стандартизации и сертификации в России.

На законодательном уровне понятие «риск» также используется:

– в Федеральном законе от 21.07.1997 № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» рассматривает риски аварий на опасных производственных объектах. Также этот закон устанавливает для федерального государственного надзора в области промышленной безопасности необходимость применения системы оценки и управления рисками при проведении плановых контрольных (надзорных) мероприятий (риско-ориентированный надзор);

– в Федеральном законе от 21.12.1994 № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» рассматривает риски возникновения чрезвычайных ситуаций (быстроразвивающихся опасных природных явлений и техногенных процессов) и устанавливает необходимость страхования таких рисков;

– в Федеральном законе от 10.01.2002 № 7-ФЗ «Об охране окружающей среды» определяет возникновение экологических рисков и устанавливает необходимость страхования таких рисков;

– в Федеральном законе от 22.07.2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» устанавливает требования пожарной безопасности к производственным объектам и порядок проведения анализа пожарной опасности производственного объекта и расчета пожарного риска.

Подходы к организации управления рисками на общекорпоративном уровне также регламентируются нормативными документами государственных органов власти. К таким документам можно отнести:

– Федеральный закон от 26.12.1995 № 208-ФЗ «Об акционерных обществах» устанавливает, что в публичном

обществе должны быть организованы управление рисками и внутренний контроль. При этом принципы и подходы к организации системы управления рисками и внутреннего контроля в обществе компания определяет самостоятельно (ответственность Совета директоров);

– Кодекс корпоративного управления Банка России (письмо Банка России от 10 апреля 2014 г. № 06-52/2463);

– Методические указания по подготовке положения о системе управления рисками, разработанных Федеральным агентством по управлению государственным имуществом и одобренных Поручением Правительства Российской Федерации от 24 июня 2015 г. № ИШ-П13-4148 и т.п.

Среди всего перечня стандартов следует выделить нормативные документы, затрагивающих вопросы управления рисками, связанными с безопасностью эксплуатации различных объектов железнодорожного транспорта (в том числе функциональной безопасностью, безопасностью движения, пожарной безопасностью и т.д.) – преимущественно документация, созданная в рамках проекта УРРАН.

Терминологические и управленческие положения известных мировых стандартов риск-менеджмента, которые наилучшим образом отвечают целям и задачам железнодорожного транспорта и учитывают его специфику, отражены в ГОСТ 33433-2015 «Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте». Остальные документы проекта УРРАН в области оценки рисков используют принятую в нем терминологию и подход (содержат ссылку на него или на его более раннюю национальную версию ГОСТ Р 54505-2011 «Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте»).

Сравнительный анализ терминологии основных нормативно-методических документов, регламентирующих процесс управления рисками

Проведем сравнительный анализ терминологии ГОСТ 33433-2015 «Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте» (рис. 6) с актуальными международными и национальными стандартами и документами высшего уровня корпоративного управления (Концепции, Политики СУРиБК). Согласно ГОСТ Р ИСО 31000-2019 «Менеджмент риска. Принципы и руководство» процесс менеджмента риска должен быть неотъемлемой частью управления и принятия решений и интегрирован в структуру, операционную деятельность и процессы организации, и он может применяться на стратегическом, операционном, программном или проектном уровнях и включает следующие этапы:

1) Оценка риска (risk assessment)

1.1) Идентификация риска (risk identification) – процесс определения, составления перечня и описания элементов риска (Руководство ИСО 73:2009 Менеджмент риска. Термины и определения);

1.2) Анализ риска (risk analysis)

1.2.1) Правдоподобность (likelihood) – правдоподобность (появления события) – характеристика возможности

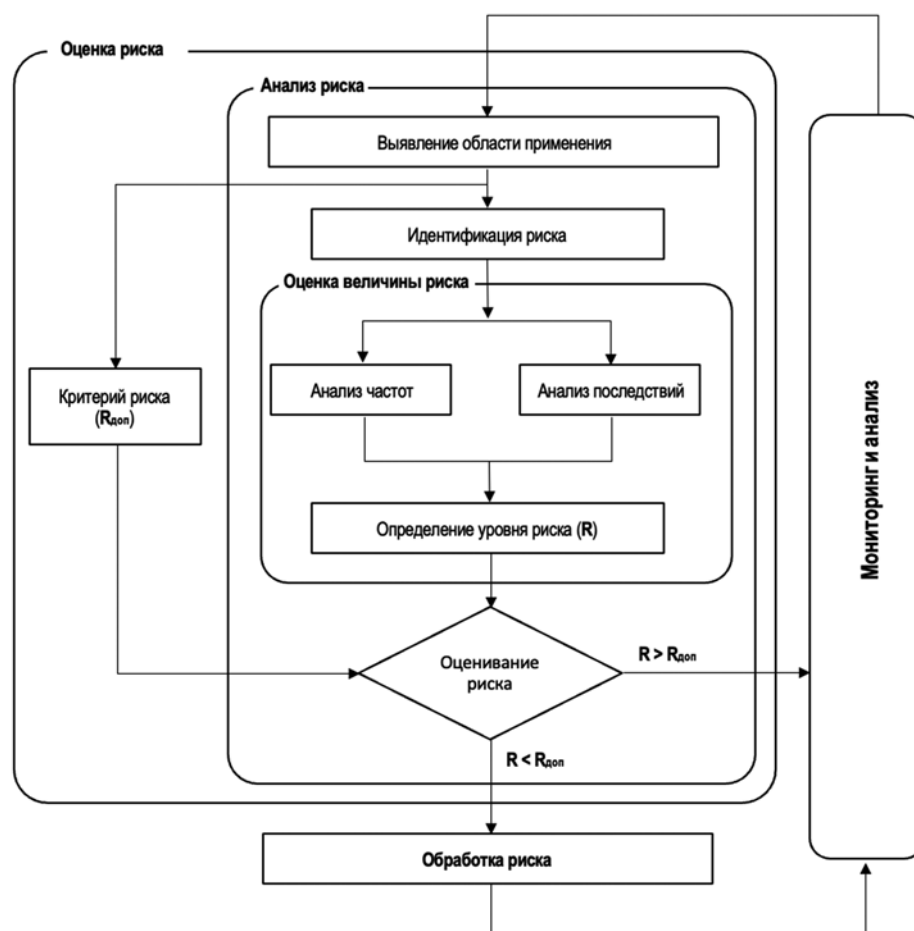


Рис. 6 – Процесс управления рисками согласно ГОСТ 33433-2015 «Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте»

и частоты проявления события. Примечание – В менеджменте риска термин «правдоподобность» используют как характеристику возможности появления события, которая может быть определенной или неопределенной, измеримой или неизмеримой, объективной или субъективной, иметь качественную или количественную оценку и может быть выражена математически (как вероятность или частота за установленный период времени (Руководство ИСО 73:2009 Менеджмент риска. Термины и определения);

1.2.2) Последствия, значимость (consequences);

1.2.3) Вычисление уровня риска (compute level of risk);

1.3) Сравнительная оценка риска (risk evaluation) – процесс сравнения результатов анализа риска с критериями риска для определения приемлемости риска. Примечание – Сравнительная оценка риска может быть использована при принятии решения об обработке риска (Руководство ИСО 73:2009 Менеджмент риска. Термины и определения).

2) Обработка риска (risk treatment) – процесс модификации риска. Примечание 1 – Обработка риска может включать в себя **исключение риска** путем принятия решения не начинать или не продолжать деятельность, в процессе или в результате которой может возникнуть опасное событие; **принятие или повышение риска** для обеспечения более широких возможностей; **устранение источника риска**; изменение правдоподобности /

вероятности опасного события; **изменение последствий опасного события**; **разделение риска с другой стороной или сторонами** (путем включения в контракты или финансирования обработки риска); обоснование решения о сохранении риска. Примечание 2 – Меры по обработке риска могут включать в себя устранение, предотвращение или снижение риска. Примечание 3 – При обработке риска могут возникнуть новые риски и могут измениться существующие риски (Руководство ИСО 73:2009 Менеджмент риска. Термины и определения);

3) Мониторинг и пересмотр риска.

Как видно из рис. 6, процесс управления рисками в ГОСТ 33433-2015 в целом соответствует процессу ISO 31000 (см. рис. 4). Различаются наименования разных этапов и подэтапов, а также процесс задания критерия приемлемости риска внесен в процесс оценки, в то время как ISO рекомендует определить критерий до начала процедуры оценки. На схеме также нет указания на необходимость документирования всех процессов (хотя в тексте стандарта такие требования прописаны), а также указания на итерационность процесса оценки и обработки риска, как это сделано на схеме в ISO 31000. Избыточным также представляется повторение термина «анализ» в сочетании с мониторингом. Анализ уже присутствует на этапе оценки риска, подразумевая, что

Табл. Сравнительный анализ основных терминов в области управления рисками технических систем (в алфавитном порядке)

Наименование термина	ГОСТ Р ИСО 31000:2019 «Менеджмент риска. Принципы и руководство»	ГОСТ 33433-2015 «Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте»	ГОСТ Р 51897-2021. Руководство ИСО 73:2009 «Менеджмент риска. Термины и определения»	ГОСТ IEC 60050-903:2017 «Международный электротехнический словарь. Часть 903. Оценка риска»	Политика по управлению рисками и внутреннему контролю ОАО «РЖД» (утв. решением совета директоров ОАО «РЖД» (протокол от 27 мая 2019 г. № 17))
Анализ риска	–	Систематическое использование информации для определения источников и количественной оценки риска	Процесс изучения сути и содержания риска и определения уровня риска	Систематическое использование имеющейся информации для выявления опасностей и оценки риска	Этап «Анализ и оценка рисков» направлен на определение вероятности реализации и величины влияния выявленных рисков, сопоставление рисков между собой для определения наиболее существенных/критичных и включает: определение текущего уровня (итоговой оценки) каждого выявленного риска на основании величины влияния и вероятности реализации риска; ранжирование рисков на основании итоговой оценки; определение и описание ключевых индикаторов риска
Вероятность	–	Мера того, что событие может произойти	Характеристика возможности и частоты появления события. Примечание 1 – В менеджменте риска термин «вероятность» означает шанс того, что что-то может произойти, независимо от того, установлено ли это, измерено или определено объективно или субъективно, качественно или количественно, и описывается с помощью одних понятий или математически (как частота за установленный период времени) Примечание 2 – Английский термин «likelihood» не имеет прямого перевода на некоторые языки: вместо этого часто используется перевод слова «probability». Однако в английском языке термин «probability» часто понимают в узком математическом смысле 1). Поэтому в терминологии менеджмента риска термин «likelihood» используется для придания ему настолько же широкого смысла, какой имеет слово «probability» во многих языках, кроме английского	–	Вероятность реализации риска – мера возможности реализации риска
Допустимый уровень риска	–	Уровень риска, который приемлем при данных обстоятельствах на основании, существующих в текущий период времени ценностей в обществе	–	Риск, который считается приемлемым, исходя из нынешних ценностей общества	Уровень риска, при котором он не окажет существенного влияния на достижения целей Общества, подразделения, бизнес-процесса, проекта и др.

Наименование термина	ГОСТ Р ИСО 31000:2019 «Менеджмент риска. Принципы и руководство»	ГОСТ 33433-2015 «Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте»	ГОСТ Р 51897-2021. Руководство ИСО 73:2009 «Менеджмент риска. Термины и определения»	ГОСТ IEC 60050-903-2017 «Международный электротехнический словарь. Часть 903. Оценка риска»	Политика по управлению рисками и внутреннему контролю ОАО «РЖД» (утв. решением совета директоров ОАО «РЖД») (протокол от 27 мая 2019 г. № 17))
Идентификация риска	–	Процесс нахождения, составления перечня и описания элементов риска	Процесс выявления, определения и описания риска	–	Этап «Выявление рисков» направлен на определение подверженности Общества влиянию рисков, реализация которых может отразиться на достижении целей и/или причинить убытки (ущерб, упущенную выгоду), и включает: выявление и анализ целей; выявление и описание рисков на установленном горизонте оценки рисков в привязке к целям; определение и описание риск-факторов, возможных последствий от реализации риска; определение / назначение владельцев рисков; классификация рисков
Источник риска	Объект или деятельность, которые самостоятельно или в комбинации с другими факторами способны вызывать повышение риска	Фактор, который может самостоятельно или в сочетании с другими факторами способствовать возникновению рисков	Объект, ситуация или действие, которые самостоятельно или в комбинации могут повлечь за собой риск	–	Источник риска (риск-фактор) – внутренний или внешний фактор (обстоятельство, событие), который отдельно или в комбинации с иными факторами может привести к реализации риска
Мероприятие по воздействию на риск	–	Процесс выбора и выполнения мероприятий для изменения риска	Способ воздействия на риск, направленный на удержание и/или изменение риска	–	Мероприятие (действие, комплекс взаимосвязанных действий), направленное на снижение вероятности и/или величины влияния риска (то есть на риск-факторы и/или последствия реализации риска) в рамках выбранной стратегии (метода) воздействия на риск. В Обществе применяются следующие стратегии (методы) воздействия на риск: избежание риска, минимизация риска (включая разработку и выполнение контрольных процедур), принятие риска, передача риска. Контрольная процедура является наиболее предпочтительным способом воздействия на риск
Мониторинг	–	Постоянная проверка, надзор, наблюдение и определение текущего состояния с целью выявления изменений по сравнению с ожидаемыми или требуемыми показателями	Постоянный (непрерывный) анализ, надзор, критическая оценка, наблюдение за отклонениями от запланированного или требуемого состояния	–	Мониторинг и пересмотр – постоянный или периодический анализ деятельности, осуществляемый на предмет изменения портфеля рисков (выявление новых рисков, изменение оценки выявленных рисков), контроля результатов воздействия на риски (в том числе реализации запланированных мероприятий, включая контрольные процедуры, на предмет своевременности их исполнения и эффективности), необходимости корректировки, внедрения новых процедур воздействия на риски (включая процедуры реагирования на реализовавшиеся риски)
Опасное событие	Возникновение или изменение специфического набора условий	Событие, которое может причинить вред	Происшествие, проявление или изменение совокупности обстоятельств ¹	Событие, способное причинить вред	Реализовавшийся риск – событие, произошедшее в рассматриваемом периоде и негативно повлиявшее на достижение целей Общества (Подразделения, бизнес-процесса, проекта и др.)

¹ Приведено определение «события»

Наименование термина	ГОСТ Р ИСО 31000:2019 «Менеджмент риска. Принципы и руководство»	ГОСТ 33433-2015 «Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте»	ГОСТ Р 51897-2021. Руководство ИСО 73:2009 «Менеджмент риска. Термины и определения»	ГОСТ IEC 60050-903-2017 «Международный электротехнический словарь. Часть 903. Оценка риска»	Политика по управлению рисками и внутреннему контролю ОАО «РЖД» (утв. решением совета директоров ОАО «РЖД» (протокол от 27 мая 2019 г. № 17))
Остаточный риск	–	Риск, остающийся после обработки риска	Риск, оставшийся после воздействия на него	Риск, остающийся после принятия защитных мер	Уровень риска, сохраняющийся после воздействия на него
Оценка риска	Это процесс, охватывающий идентификацию риска, анализ риска и сравнительную оценку риска	Общий процесс анализа риска и оценивания риска	Процесс, охватывающий идентификацию риска, анализ риска и оценивание риска ¹	Общий процесс, включающий в себя анализ риска и определение степени риска	Процедура определения вероятности реализации и степени (величины) влияния риска с целью определения уровня риска (итоговой оценки)
Пересмотр	–	Деятельность, направленная на установление соответствия, адекватности или эффективности предмета рассмотрения установленным целям	Деятельность, предпринимаемая для определения применимости, адекватности и эффективности объекта или действий для достижения установленных целей	–	Мониторинг и пересмотр – постоянный или периодический анализ деятельности, осуществляемый на предмет изменения портфеля рисков (выявление новых рисков, изменение оценки выявленных рисков), контроля результатов воздействия на риски (в том числе реализации запланированных мероприятий, включая контрольные процедуры, на предмет своевременности их исполнения и эффективности), необходимости корректировки, внедрения новых процедур воздействия на риски (включая процедуры реагирования на реализовавшиеся риски)
Риск	Следствие влияния неопределенности на достижение поставленных целей Примечание 1 – Под следствием влияния неопределенности необходимо понимать отклонение от ожидаемого результата или события (позитивное и/или негативное). Примечание 2 – Цели могут быть различными: мы по содержанию (в области экономики, здоровья, экологии и т.п.) и назначению (стратегические, общеорганизационные, относящиеся к разработке проекта, конкретные к разработке проекта, конкретной продукции и процессу). Примечание 3 – Риск часто характеризуют путем описания возможного события и его последствий или их сочетания. Примечание 4 – Риск часто представляют в виде последствий возможного события (включая изменения обстоятельств) и соответствующей вероятности. Примечание 5 – Неопределенность – это состояние полного или частичного отсутствия информации, необходимой для понимания события его последствий и их вероятностей ²	Сочетание вероятности события и его последствий. Примечание – Термин «риск» обычно используется тогда, когда существует хотя бы возможность негативных последствий	Влияние неопределенности на достижение поставленных целей ³ Примечание 1 – Под следствием влияния неопределенности необходимо понимать отклонение от ожидаемого результата или события (позитивное и/или негативное). Примечание 2 – Цели могут быть различными по содержанию (в области экономики, здоровья, экологии и т.п.) и назначению (стратегические, общеорганизационные, относящиеся к разработке проекта, конкретной продукции и процессу). Примечание 3 – Риск часто характеризуют путем описания возможного события и его последствий или их сочетания. Примечание 4 – Риск часто представляю в виде последствий возможного события (включая изменения обстоятельств) и соответствующей вероятности. Примечание 5 – Неопределенность – это состояние полного или частичного отсутствия информации, необходимой для понимания события, его последствий и их вероятностей.	Сочетание вероятности возникновения ущерба и тяжести этого ущерба. Примечание 1 – Во французском языке термин «risque» также обозначает потенциальный источник вреда, в английском языке – «опасность» (см. 903-01-02)	Возможное событие, которое при реализации может негативно отразиться на достижении целей Общества (подразделения, бизнес-процесса, проекта и др.), характеризующееся вероятностью реализации и величиной влияния

¹ Приведено определение «измерение риска»

² В соответствии с ФЗ «О техническом регулировании» от 27.12.2002 № 184-ФЗ «риск – это вероятность причинения вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни или здоровью животных и растений с учетом тяжести этого вреда».

Наименование термина	ГОСТ Р ИСО 31000:2019 «Менеджмент риска. Принципы и руководство»	ГОСТ 33433-2015 «Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте»	ГОСТ Р 51897-2021. Руководство ИСО 73:2009 «Менеджмент риска. Термины и определения»	ГОСТ IEC 60050-903-2017 «Международный электротехнический словарь. Часть 903. Оценка риска»	Политика по управлению рисками и внутреннему контролю ОАО «РЖД» (утв. решением совета директоров ОАО «РЖД» (протокол от 27 мая 2019 г. № 17))
Управление риском	Меры, направленные на изменение риска	Согласованная деятельность, направленная на управление и руководство предприятием в отношении рисков	Скоординированные действия по руководству, контролю и управлению организацией с учетом риска ⁴	–	Непрерывный, итеративный процесс, осуществляемый на всех уровнях управления (организационной иерархии) и охватывающий все виды деятельности Общества, интегрируемый в миссию, стратегию, бизнес-процессы, проекты, программы, инициативы, проточную деятельность Общества и направленный на предоставление разумной уверенности в достижении целей Общества (подразделения, бизнес-процесса, проекта и др.). Процесс управления рисками включает выявление, анализ и оценку, воздействие (реагирование) на риск, мониторинг и пересмотр, обмен информацией и консультирование
Уровень риска	–	Масштаб риска или совокупности рисков, который характеризуется определенным сочетанием последствий и вероятности их возникновения	Размер риска или комбинации рисков, характеризующий последствиями и их вероятностью	–	Величина риска, выраженная как комбинация вероятности реализации риска и величины влияния риска

⁴ Приведено определение «менеджмент риска»

в случае необходимости пересмотра тех или иных рисков, именно анализ будет основанием такого пересмотра.

С учетом вышесказанного сформируем таблицу (табл.) с ключевыми понятиями, касающимися процесса управления риском.

Анализ ключевых понятий, приведенных в табл., позволяет определить ситуацию с терминологией, которая применяется в нормативных документах, регулирующих процесс управления рисками, как катастрофическую. Несмотря на то, что в преамбулах почти всех документов утверждается, что они являются практически аутентичными версиями зарубежных стандартов, в реальности практически не встречается двух одинаковых определений одного и того же термина.

И если расхождение на уровне документов корпоративного управления и документов технического регулирования можно отнести на изначально разные базовые концепции (в технике за основу взята обновленная концепция ISO 31000, а в документах управления – более ранняя концепция COSO), то разнообразие в близких по духу нормативных документах, регулирующих процесс управления рисками в технической области, вызывает, по меньшей мере, удивление. В определении каждого понятия любое слово имеет смысл, и такое ошеломляющее разнообразие в определении одинаковых понятий неизбежно вызывает конфликт вначале разных уровнях управления компаниями.

Помимо различий в терминологии, указанные стандарты имеют расхождения в части применяемых классификаций рисков. К настоящему времени практически в каждом документе (включая нормативные документы государственного или корпоративного уровня), научной монографии или учебном пособии приводится тот или иной вариант классификации рисков. В большинстве случаев выбранные критерии не позволяют охватить все множество рисков и, исходя из этого, достаточно частыми являются попытки классифицировать подмножества рисков, входящих в эти общие понятия. Различаются и наименования, и нюансы описания самого процесса управления рисками.

Помимо рассмотренных в табл. нормативно-методических документов, существуют различные требования надзорных органов к обеспечению безопасности в промышленности, частично раскрывающие вопросы управления рисками на транспорте и в производстве.

Например, Федеральный закон от 27.12.2002 № 184-ФЗ «О техническом регулировании» устанавливает свое определение термина «риск»: вероятность причинения вреда жизни или здоровью граждан, имуществу физических или юридических лиц, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде, жизни или здоровью животных и растений с учетом тяжести этого вреда.

Технический регламент Таможенного союза области железнодорожного транспорта, не определяя «риск», устанавливает критерий «допустимого уровня риска», понимая по ним значение риска, связанное с применением продукции, определяемое исходя из технических и экономических возможностей производителя и соответствующее уровню безопасности, который должен обеспечиваться на всех стадиях жизненного цикла продукции.

Эти определения необходимо учитывать в разрабатываемых документах, регулирующих процесс управления рисками на корпоративном уровне.

Заключение

Таким образом, в процессе достижения целевой эффективности функционирования неизбежно возникают задачи, связанные с обеспечением надежности и безопасности современных технических систем (включая технические системы и комплексы железнодорожного транспорта). Риски, являющиеся следствием влияния различных неопределенностей на достижение этой цели, выступают в качестве качественной или количественной оценки возникающих в процессе функционирования технических систем угроз. Отсутствие в национальной системе стандартизации Российской Федерации единой общепринятой концепции риска затрудняет внедрение принципов риск-ориентированного подхода в управление компаниями и порождает конфликты и непонимание между разными уровнями управления и ответственности в них.

В контексте функционирования технических систем следует различать «риск» как понятие, определяющее нежелательное событие, оценку существующих угроз и «управление рисками», как целенаправленный процесс, способствующий снижению выявленных, оцененных и обработанных рисков до приемлемого уровня на всех стадиях жизненного цикла анализируемой технической системы. Кроме того, современная концепция риск-ориентированного подхода дополняет «управление рисками» процедурой «внутреннего контроля».

Термин «риск» многозначен и до сих пор не определен. Многолетние исследования привели к формированию несколько базовых концепций (FERMA, COSO, ISO). Эти концепции не противоречат друг другу, однако имеют различия. По «старшинству» и универсальности за основу целесообразно (на взгляд авторов статьи) принять формулировку ISO 31000, как вводящую наиболее общее определение понятия «риск». Определения, использованные ранее, так или иначе вписываются в определение ISO 31000 (последнее содержит пять примечаний, раскрывающих его смысл).

Термин «управление рисками» и сама процедура, следующая из определения этого термина, различается в разных, действующих в настоящее время документах (включая разработанные в ОАО «РЖД» Политики, ГОСТы, СТО, Положения и руководства).

Во всех стандартах по управлению рисками в большей или меньшей степени заложен комплексный подход к

управлению рисками, а этап оценки рисков выделен отдельно, и следует за (либо сочетается с) этапом идентификации рисков. Трудность оценки возникает из-за того, что более-менее легко «измеримые» в стоимостном выражении финансовые риски для нефинансовых компаний составляют, как правило, лишь небольшую часть. Важна не точность оценки этих рисков, а их выявление, учет и контроль.

Необходима последовательная, системная работа по формированию нормативно-методического обеспечения отечественной системы управления рисками «сверху до низу» – от концептуальных документов через федеральные законы и технические регламенты к национальным стандартам и стандартам организаций. Все эти документы должны быть «прошиты» единой терминологией и правилами построения. Должны быть стандартизованы ключевые методы анализа рисков.

Как уже упоминалось выше, в ближайшее время предполагается актуализация основного стандарта по рискам для железнодорожного транспорта ГОСТ 33433-2015. В рамках данной актуализации, в том числе, предлагается провести и гармонизацию терминологии, применяемой в железнодорожной отрасли в данной сфере регулирования и управления. В этой связи представляется важным унифицировать терминологию, используемую в процессах управления рисками, начиная с определения самого термина «риск» и заканчивая названиями этапов процесса управления рисками, например, путем разработки единого глоссария (терминологического словаря) риск-менеджмента на железнодорожном транспорте, учитывающего специфику технических систем.

Авторы статьи приглашают всех заинтересованных специалистов в данной области высказать свое мнение и предложить конструктивные предложения по озвученной проблематике.

Благодарности

Авторы статьи выражают благодарности Бочкову Александру Владимировичу и Новожилову Евгению Олеговичу за полезные обсуждения и замечания при написании данной работы.

Библиографический список

1. Гусак А.А. Теория вероятностей. Справочное пособие к решению задач / А.А. Гусак, Е.А. Бричикова. Изд-е 4-е, стереотип. Мн.: ТетраСистеме, 2003. 288 с.
2. Вишняков Я.Д. Общая теория рисков: Учебное пособие для студ. высш. учеб. заведений / Я.Д. Вишняков, Н.Н. Радаев. М.: Издательский дом «Академия». 555 с.
3. Королев В.Ю., Бенинг В.Е., Шоргин С.Я. Математические основы теории риска: Учебн. пособ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007. 544 с.
4. Талеб Нассим Николас. О секретах устойчивости: Эссе; Прокрустово ложе: Философские и житейские афоризмы. М.: КоЛибри, Азбука-Аттикус. 2012. 240 с.

5. Бочков А.В. О природе рисков в управлении безопасностью структурно сложных систем // Надежность. 2019. № 4. С. 53-64. DOI:10.21683/1729-2646-2019-19-4-53-64

6. Zhigirev N., Bochkov A., Kuzmina N., Ridley A. Introducing a Novel Method for Smart Expansive Systems' Operation Risk Synthesis // Mathematics. 2022. Vol. 10. P. 427. DOI: 10.3390/math10030427

7. Aven T. The risk concept – Historical and recent development trends // Reliability Engineering & System Safety. 2012. Vol. 99. Pp. 33-44. DOI: 10.1016/j.res.2011.11.006

8. Хенли Э. Дж., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска: Пер. с англ. В.С. Сыромятникова, Г.С. Деминой. Под общ. Редакцией В.С. Сыромятникова. М.: Машиностроение, 1984. 528 с.

9. Богоявленский С.Б. Управление риском в социально-экономических системах: Учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГУЭФ, 2010. 144 с.

10. Баранов А.В. Международные стандарты управления рисками: не Базелем единым // Рынок ценных бумаг. 2015. № 5. С. 23-33.

11. Гапанович В.А. Развитие и внедрение технологии УРРАН на железнодорожном транспорте // Надежность. 2013. № 4. С. 3-17. DOI: 10.21683/1729-2646-2013-0-4-3-17

12. Замышляев А.М. Прикладные информационные системы управления надежностью, безопасностью, рисками и ресурсами на железнодорожном транспорте / А.М. Замышляев. Ульяновск: Областная типография «Печатный двор», 2013. 143 с., ил.

References

1. Gusak A.A., Brichikova E.A. [Probability theory. A reference book for problem solving. 4-th edition, stereo]. Minsk: TetraSisteme; 2003. (in Russ.)

2. Vishniakov Ya.D., Radaev N.N. [General risk theory: manual for graduate students]. Moscow: Izdatelsky dom Akademia. (in Russ.)

3. Koroliov V.Yu., Bening V.E., Shorgin S.Ya. [Mathematical foundations of the risk theory; a manual]. Moscow: FIZMATLIT; 2007. (in Russ.)

4. Taleb N.N. On the secrets of stability: an Essay. The Bed of Procrustes: Philosophical and Practical Aphorisms. Moscow: Azbuka-Attikus; 2012.

5. Bochkov A.V. On the nature of risk in the safety management of structurally complex systems. *Dependability* 2019;4:53-64. DOI:10.21683/1729-2646-2019-19-4-53-64.

6. Zhigirev N., Bochkov A., Kuzmina N., Ridley A. Introducing a Novel Method for Smart Expansive Systems' Operation Risk Synthesis. *Mathematics* 2022;10:427. DOI: 10.3390/math10030427.

7. Aven T. The risk concept – Historical and recent development trends. *Reliability Engineering & System Safety* 2012;99:33-44. DOI: 10.1016/j.res.2011.11.006.

8. Henley E.J., Kumamoto H. Reliability engineering and risk assessment. Moscow: Mashinostroenie; 1984.

9. Bogoyavlensky S.B. [Risk management in socioeconomic systems: a manual]. Saint Petersburg: SPbSUE Publishing; 2010. (in Russ.)

10. Baranov A.V. [International risk management standards: not Basel alone]. *Rynok tsennykh bumag* 2015;5:23-33. (in Russ.)

11. Gapanovich V.A. [Development and deployment of the URRAN process in railway transportation]. *Dependability* 2013;4:3-17. DOI: 10.21683/1729-2646-2013-0-4-3-17.

12. Zamyshliaev A.M. [Applied information systems for managing dependability, safety, risks and resources in railway transportation]. Ulianovsk: Oblastnaya tipografia Pechatny dvor; 2013. (in Russ.)

Сведения об авторах

Бубликова Мария Александровна – начальник отделения управления рисками сложных технических систем, Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), ул. Нижегородская, д. 27, стр. 1, г. Москва, Российская Федерация, 109029, e-mail: m.bublikova@vniias.ru

Сазонов Алексей Павлович – ведущий специалист отдела стандартизации, Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), ул. Нижегородская, д. 27, стр. 1, г. Москва, Российская Федерация, 109029, e-mail: a.sazonov@vniias.ru

About the authors

Maria A. Bublikova, Head of Complex System Risk Management, Joint Stock Company Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation (JSC NIIS), 27, bldg 1 Nizhegorodskaya St., Moscow, 109029, Russian Federation, e-mail: m.bublikova@vniias.ru

Alexey P. Sazonov, Lead Specialist, Standardisation, Joint Stock Company Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation (JSC NIIS), 27, bldg 1 Nizhegorodskaya St., Moscow, 109029, Russian Federation, e-mail: a.sazonov@vniias.ru

Вклад авторов в статью

Бубликова М.А. поставила задачи, сделала мотивированные и обоснованные выводы по результатам проведенного сравнительного анализа нормативно-методической документации, сформулировала общие принципы, которыми необходимо руководствоваться при выборе использования понятия термина «риск».

Сазонов А.П. осуществил обзор и анализ нормативно-методической документации в области управления рисками, провел сравнительный анализ, выявил несоответствия терминологии.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Интеллектуальная система построения графика работы машинистов метрополитена

An intelligent system for constructing metro train driver working schedules

Маркевич А.В.^{1*}, Сидоренко В.Г.²

Markevich A.V.^{1*}, Sidorenko V.G.²

¹ТЕРРАЛИНК ДЕВЕЛОПМЕНТ, Москва, Российская Федерация, ²РУТ(МИИТ), Москва, Российская Федерация,

¹TERRALINK DEVELOPMENT, Moscow, Russian Federation, ²RUT(MIIT), Moscow, Russian Federation

*vasjuk.a@mail.ru



Маркевич А.В.



Сидоренко В.Г.

Резюме. Цель. Целью работы является апробация и анализ результатов применения интеллектуальной системы построения графика работы машинистов метрополитена, направленной на автоматизированное решение задач повышения эффективности использования рабочего времени машинистов электроподвижного состава метрополитена. Под эффективностью в данном случае в зависимости от решаемой задачи и выбранного критерия понимается сокращение числа машинистов, задействованных в реализации заданного планового графика движения поездов, повышение равномерности чередования периодов труда и отдыха машинистов, а также сокращение длительности простоев в работе внутри рабочих смен. **Методы.** В исследовании, представленном в статье, используются теория графов, рекурсивные и эвристические алгоритмы. **Результаты.** Разработаны рекурсивные алгоритмы формирования графика работы основных машинистов метрополитена и подменных машинистов во время проведения обеденных перерывов основных машинистов. Разработанные алгоритмы используются в интеллектуальной системе планирования графика работы машинистов метрополитена. Алгоритм формирования графика работы основных машинистов включает в себя назначение машинистов на предварительно сформированное из графика оборота электроподвижного состава множество рабочих участков для обеспечения движения согласно плановому графику движения пассажирских поездов метрополитена. Алгоритм формирования графика работы подменных машинистов включает в себя планирование рабочего времени подменных машинистов, исходя из возможности проведения обеденных перерывов для основных машинистов. **Заключение.** В статье представлены результаты апробации разработанной интеллектуальной системы планирования графика работы машинистов для условий Московского метрополитена на примере депо «Замоскворецкое» Замоскворецкой линии, депо «Выхино» Таганско-Краснопресненской линии, а также результаты адаптации этой системы для условий Московского Центрального Кольца. Представлен сравнительный анализ графика работы машинистов: реального и полученного с использованием разработанной интеллектуальной системы. Применение созданной системы может позволить повысить эффективность использования рабочего времени машинистов электроподвижного состава метрополитена на величину, достигающую 28%.

Abstract. Aim. The paper aims to tests and analyse the results of application of an intelligent system for constructing metro train driver working schedules that is intended for automatically improving the efficiency of utilisation of the working time of metro train drivers. In this case, depending on the task at hand and the chosen criterion, efficiency is understood as a reduction of the number of drivers involved in the implementation of the specified standard train schedule, improved uniformity of alternation of driver work and rest periods, as well as reduction of the duration of down time within work shifts. **Methods.** The study presented in the paper uses the graph theory, recursive and heuristic algorithms. **Results.** The authors have developed recursive algorithms for preparing work schedules for main metro train drivers and substitute drivers that operate during main drivers' lunch breaks. The developed algorithms are used in the intelligent system for metro train driver work schedule planning. The algorithm for generating main driver work schedule includes driver allocation to a number of work lines preliminarily defined based on the rolling stock operation schedule for the purpose of ensuring traffic according to the planned metro train schedule. The algorithm for generating substitute driver work schedule involves substitute driver work time planning based on the possibility of arranging lunch breaks for main drivers. **Conclusion.** The paper presents the results of a trial of the developed intelligent system for train driver work planning for the Moscow Metro using the example of the Zamoskvoretskoye Depot of the Zamoskvoretskaya Line, the Vkhino Depot of the Tagansko-Krasnopresnenskaya Line, as well as the results of the system's adaptation to

the Moscow Central Circle. It also presents a comparative analysis of driver work schedules, i.e., the actual one and one obtained using the developed intelligent system. The application of the developed system may enable as much as a 28% improvement of the efficiency of metro train drivers' work hour use.

Ключевые слова: интеллектуальная система, автоматизированное управление, программное обеспечение, машинист, локомотивная бригада, метрополитен.

Keywords: intelligent system, automated management, software, train driver, train crew, metro.

Для цитирования: Маркевич А.В., Сидоренко В.Г. Интеллектуальная система построения графика работы машинистов метрополитена // Надежность. 2023. №3. С. 63-72. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-3-63-72>

For citation: Markevich A.V, Sidorenko V.G. An intelligent system for constructing metro train driver working schedules. *Dependability* 2023;3:63-72. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-3-63-72>

Поступила: 20.04.2023 / **После доработки:** 27.06.2023 / **К печати:** 15.09.2023

Received on: 20.04.2023 / **Revised on:** 27.06.2023 / **For printing:** 15.09.2023

Введение

На железных дорогах нарушение пропорции между периодами труда и отдыха [1] приводит к значительному увеличению частоты нарушений в работе машинистов (рис. 1). Соблюдение норм работы машинистов, в том числе метрополитена, особенно чувствительно к возникновению нарушений, поскольку условия их труда отнесены к вредным условиям труда. Пренебрежение правилами может сказываться на здоровье и производительности сотрудников [2, 3].

Согласно статистике (рис. 1) существует связь графика работы (ГР) машиниста и качества его работы:

- число грубых нарушений возрастает как при работе с низкой продолжительностью отдыха за период, так и при привлечении сотрудников на незначительные периоды времени работы (рис. 1,а);

- частота совершения нарушений незначительно колеблется при четырехразовом привлечении сотрудников к работе в ночные периоды две смены подряд и значительно увеличивается после пятой итерации (рис. 1,б).

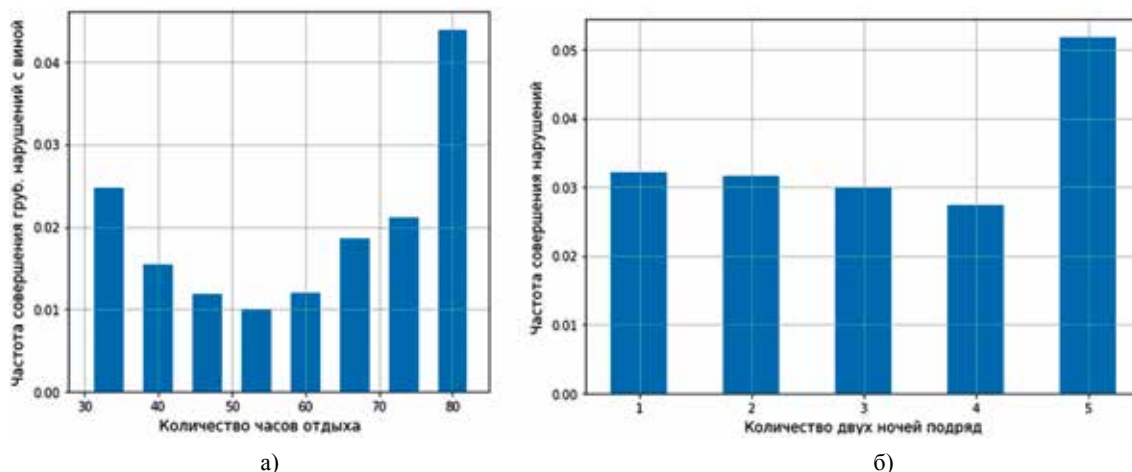


Рис. 1. Зависимость частоты совершения грубых нарушений машинистом в зависимости от соблюдения режима труда и отдыха

Создание и внедрение интеллектуальной системы построения графика работы машинистов метрополитена (ИСП ГР ММ) способствует повышению уровня соблюдения режима труда и отдыха машинистов [4, 5], а значит снижает вероятность нарушений в их работе.

Обзор источников

Использование стандартных средств составления графиков расписаний смен *Microsoft Excel* или программ на его основе [6, 7] для формирования ГР ММ невозможно, так как процесс формирования рабочих смен (РС) сотрудников напрямую зависит не только от формальных требований к условиям труда, сформулированных на базе Трудового кодекса РФ [8], Положения об особенностях режима рабочего времени и времени отдыха работников метрополитена, но и от графика оборота (ГО) электроподвижного состава (ЭПС), планового графика движения пассажирских поездов метрополитена (ПГД ППМ) [9].

В статье [10] сформирована методика автоматизированного решения задач формирования ГР ММ, включающая в себя несколько подпроцессов: составление ГР основных ММ, ГР подменных ММ, ГР маневровых ММ.

В статье приводятся алгоритмы формирования ГР основных и подменных ММ. Методика повышения эффективности использования рабочего времени маневровых машинистов (работа маневровых машинистов похожа на соответствующую методику для подменных ММ, поскольку процесс их работы строго регламентирован ПГД ППМ), а именно длительностью оборотов в различные промежутки времени. Под эффективностью в данном случае понимается сокращение числа машинистов, задействованных в реализации заданного ПГД ППМ и сокращение длительности простоев в работе внутри рабочих смен.

При реализации ИСП ГР ММ обязательные требования к условиям труда и отдыха ММ согласно нормативным документам использовались в качестве ограничений и параметров модели [10].

Методы и используемые данные

Решение задачи формирования ГР основных ММ проводилось в два этапа:

- первичное деление ГО ЭПС на рабочие участки (РУ), из которых формируются РС с учетом перерывов в работе, времени приемки и сдачи ЭПС;

- распределение времени работы ММ по графику РУ.

Распределение ГО ЭПС по РУ проводилось со следующими особенностями:

- равномерное разделение ГО таким образом, чтобы продолжительность РУ не превышала фиксированное значение (один из параметров модели, не включающий время приемки / сдачи ЭПС);

- «укорачивание» первого за день РУ проводилось в случае, когда между его началом и окончанием последнего РУ накануне существует такой промежуток времени (в рассматриваемых примерах 3 часа), который допускает теоретическую возможность связи этих РУ и выход одного ММ на оба РУ [10].

Для распределения ММ по графику РУ и решения задачи повышения эффективности формирования ГР основных ММ с точки зрения сокращения числа задействованных ММ и повышения равномерности чередования периодов труда и отдыха разработан

рекурсивный алгоритм [10]. Согласно алгоритму реализуется направленный выбор элементов множества ММ по принципу: при переходе к следующему РУ первым рассматривается тот ММ, который за последнюю неделю сформированного ГР привлекался к работе меньше остальных.

Компактность нагрузки персонала достигается путем минимизации среднеквадратичного отклонения при распределении основных ММ по РУ K :

$$K = \sqrt{\frac{1}{I_{MW} - 1} \sum_{i=1}^{I_{MW}} (RS_i - \overline{RS})^2}, \quad (1)$$

где RS_i – продолжительность i -й рабочей смены (РС) ММ; $\overline{RS}$ – средняя продолжительность РС ММ за период; I_{MW} – число задействованных основных ММ.

Результаты

При решении задачи использовалось несколько параметров разбиения ГО на РУ (рис. 2). При первичном разбиении ГО на РУ с длительностью от 4-х до 5-и часов для депо «Замоскворецкое» Замоскворецкой линии (ЗЛ) и 6-и часов для депо «Выхино» Таганско-Краснопресненской линии (ТКЛ) Московского метрополитена при применении алгоритма для реализации работы одного состава в течение 39-и (ЗЛ) и 37-и (ТКЛ) дней работы требовалось привлечение 5-и основных ММ. При увеличении шага первичного разбиения РУ до 7 и 5,5 часов, соответственно, потребовалось привлечение уже 4-х основных ММ. Далее приведены результаты для продолжительностей РУ, равных 7 и 5,5 часам, до их «укорачивания» исходя из принципа минимизации числа привлекаемых ММ.

На рис. 3 приведены результаты решения задачи формирования ГР основных ММ с минимальным из рассмотренных значений критерия качества (1), полученные с использованием ИСП ГР ММ. Решения приведены для депо «Замоскворецкое» ЗЛ и депо «Выхино» ТКЛ. По оси ординат определяется режим работы ММ: движению ЭПС соответствует уровень 1; приемке ЭПС – 1,5; сдаче ЭПС – 0,5.

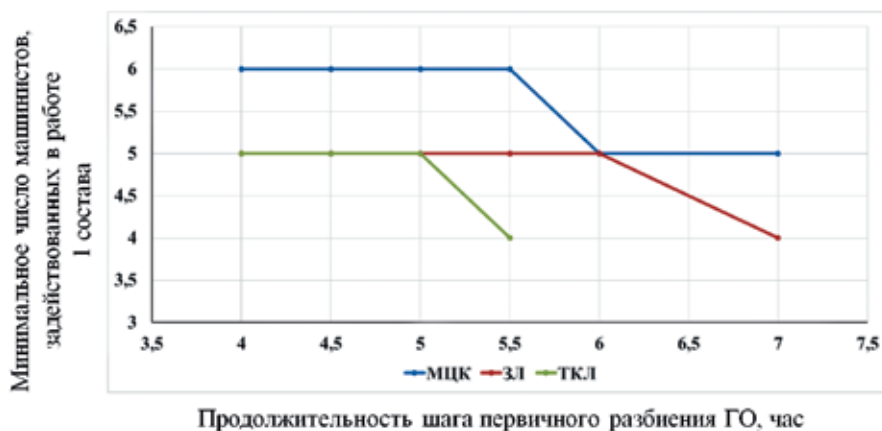


Рис. 2. Зависимость числа задействованных машинистов от продолжительности РУ для первых 1000 рассмотренных решений

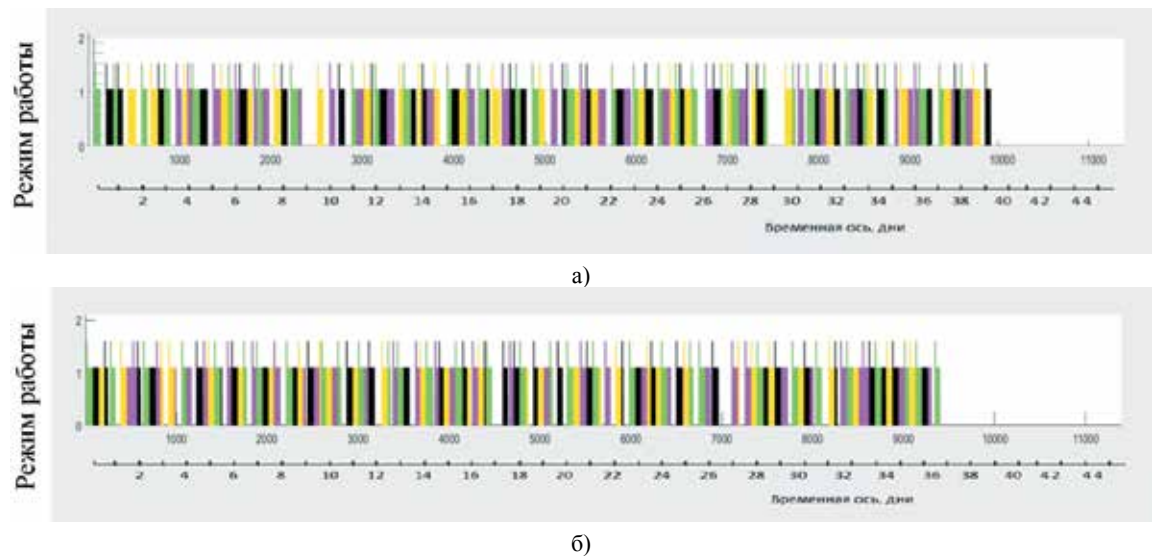


Рис. 3. Полученные с использованием ИСП ГР ММ результаты решения задачи формирования ГР основных ММ для: а) Депо «Замоскворецкое» ЗЛ; б) Депо «Выхино» ТКЛ

Условные обозначения: зеленым цветом обозначены интервалы работы основного ММ №1; черным – основной ММ №2; желтым – основной ММ №3; розовым – основной ММ №4

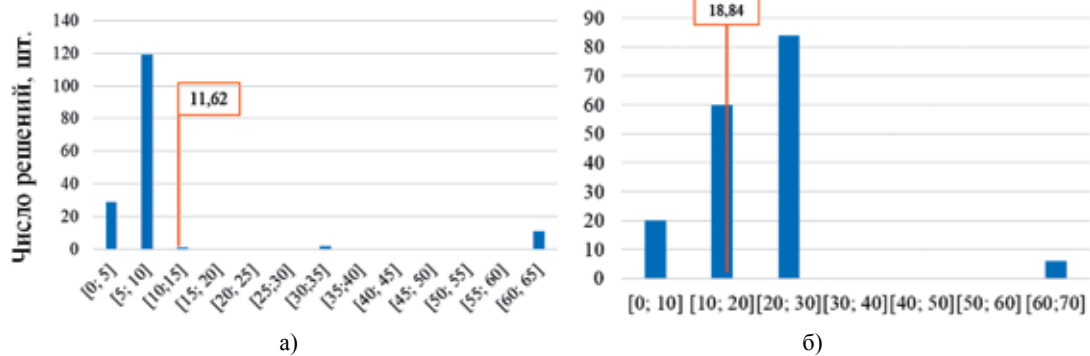


Рис. 4. Столбчатые диаграммы распределения значений критерия (1) по множеству решений: а) Депо «Замоскворецкое» ЗЛ; б) Депо «Выхино» ТКЛ, оранжевой линией указано среднее значение критерия

Анализ полученных результатов решения задачи распределения основных ММ по графику РУ приведен в табл. 1 и на рис. 4. По мере работы алгоритма для сокращения времени, в рамках которого могут быть получены удовлетворительные решения, отсеивались решения, в реализации которых участвовали 6-ь и более ММ.

На рис. 4 приведено распределение значений средне-квадратичного отклонения при распределении основных ММ по РУ для множества решений.

Решение для полного ГО ЭПС формируется путем смещения решения для первого маршрута на одни сутки влево и тиражирования решения.

На рис. 5 показано перемещение составов между маршрутами при реализации ПГД ППМ в течение 39-и дней для депо «Замоскворецкое» ЗЛ. Каждый следующий маршрут повторяет предыдущий с учетом сдвига на один день, исключая субботу и воскресенье. Для выходных дней ГР ММ формируется аналогично, как для рабочих, только по ГО выходных дней.

Табл. 1. Анализ рассмотренных решений задачи автоматизации работы основных ММ

Линия	Число задействованных ММ	Число рассмотренных решений	Число отверженных решений	Период учета	Худшее из рассмотренных значений среднеквадратичного отклонения за весь период учета, час	Лучшее из рассмотренных значений среднеквадратичного отклонения за весь период учета, час
ЗЛ	4-5	3199	162	39	63,46	1,12
	≥ 6		35		Решения отсеяны из-за большого числа задействованных ММ	
ТКЛ	4-5	5201	170	37	60,64	1,34
	≥ 6		151		Решения отсеяны из-за большого числа задействованных ММ	

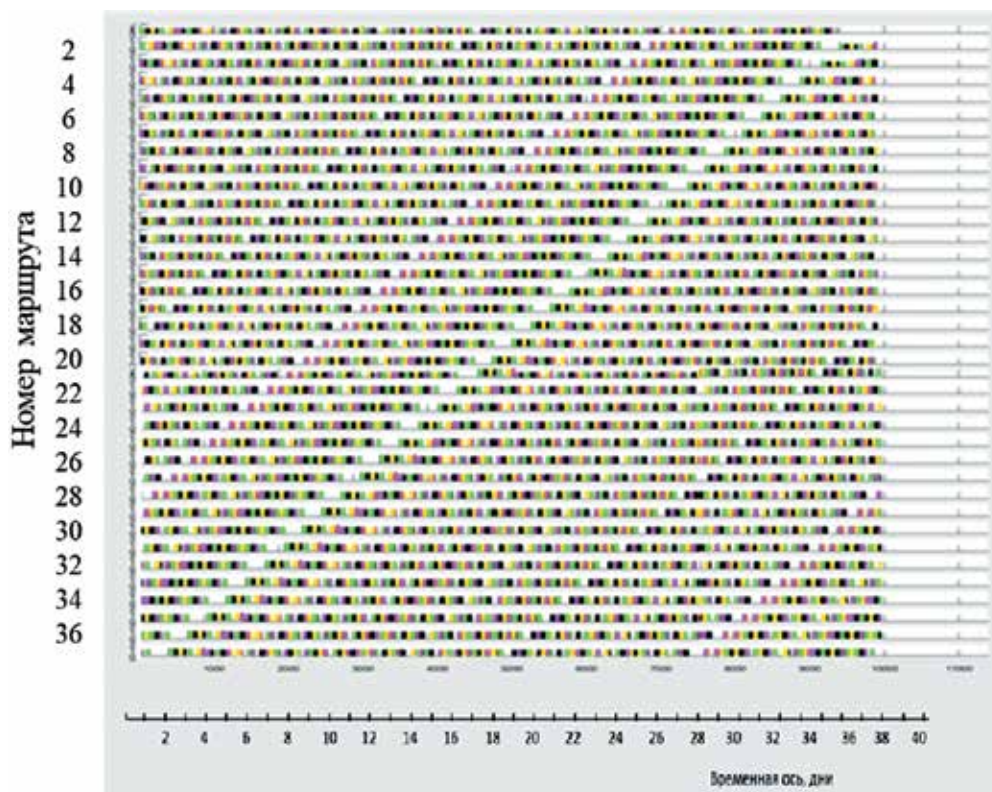


Рис. 5. Полученные с использованием ИСП ГР ММ результаты решения задачи распределения времени работы ММ для депо «Выхино» ТКЛ.

Условные обозначения: зеленым цветом обозначены интервалы работы основного ММ №1; черным – основной ММ №2; желтым – основной ММ №3; розовым – основной ММ №4

Табл. 2. Сравнение расчетного и реального примеров ГР ММ, ЗЛ

Линия	Условные обозначения	Период учета, дни	Число проработанных РУ	Суммарная продолжительность РС, час	Продолжительность работы в неделю, час
ЗЛ	ММ №1	26	18	101,6	27,4
	ММ №2		16	100,7	27,1
	ММ №3		15	104,0	28,0
	ММ №4		15	98,6	26,6
	Сумма		64	404,9	109,0
	ММ №1	26	16	111	30,03
	ММ №2		15	111	29,94
	ММ №3		19	133	35,95
	ММ №4		12	78	21,1
	Сумма		62	433	117

Табл. 3. Сравнение расчетного и реального примеров ГР ММ, ТКЛ

Линия	Обозначение	Период учета, дни	Число отработанных РУ	Суммарная продолжительность РС, час	Продолжительность работы в неделю, час
ТКЛ	ММ №1	30	25	119	27,77
	ММ №2		29	124,1	28,95
	Сумма ММ №1 и №2		54	243	56,8
	ММ №3		27	122,8	28,65
	ММ №4		29	124,8	29,11
	Сумма ММ №3 и №4		56	247,6	57,8
	ММ №1	30	14	104	24,27
	ММ №2		24	147,8	34,5
	Сумма ММ №1 и №2		38	252	58

Табл. 4. Условия работы. Особенности работы и различия для ММ и машинистов МЦК

п/п	Лингвистическое описание условия для ММ	Лингвистическое описание расхождения условия для машинистов МЦК
1	Допускается не более 36 рабочих часов (a_1) в неделю	Производится учет за месяц (136 часов) или около 32 часов в неделю
2	Рабочих часов в день: $\leq 8,5$ (a_6) или ≤ 12 (a_7) в 2 смены (при этом $8 + < 4$) (a_8, a_9)	Продолжительность смены 12 часов, но после 6-10,5 часов работы в качестве основного машиниста МЦК переходит к задачам подменного и маневрового машиниста.
3	Нельзя устанавливать более 2-х смен подряд, охватывающих промежутков [$a_0=00:00$; $a_{10}=5:00$]	$[a_0=22:00$; $a_{10}=7:00]$
4	Отдых сегодня $\geq 2 \times$ Работа вчера (a_{15})=2	После ночного отдыха в пункте оборота не более 10 часов, из них не более 3 кругов по МЦК.
5	При работе ночью в 2 смены перерыв между ними должен быть $\geq 2,5$ часа (a_{21}). При учете ночные смены относятся к тем суткам, когда они были начаты.	Отдых в пункте оборота не менее $\frac{1}{2}$ отработанного времени, но не менее 3 часов.

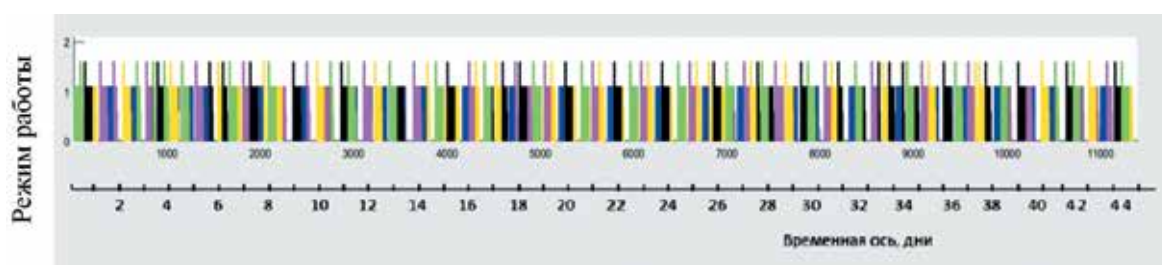


Рис. 6. Полученные с использованием ИСП ГР ММ результаты решения задачи поиска лучшего из рассмотренных ГР основных машинистов МЦК

Условные обозначения аналогичны рис. 3, синим цветом обозначены интервалы работы основного машиниста №5

Сравнение реально действующего и расчетного ГР основных ММ

Для определения качества созданной модели проведено сравнение реально действующего и расчетного ГР основных ММ ЗЛ и ТКЛ (рис. 3, табл. 2, 3).

Согласно расписанию нарядов ЗЛ к обеспечению работы 39 маршрутов депо «Замоскворецкое» привлекается 240 ММ. При этом не существует четкого соответствия между ММ и ЭПС, что не характерно для большинства линий Московского метрополитена. Согласно данным ТКЛ 37 маршрутов депо «Выхино» обслуживает около 200 ММ. При этом по данным ТКЛ сотрудники часто перерабатывают (зафиксировано за год в среднем 50 часов переработки у каждого сотрудника). Согласно расчетной модели для ЗЛ в рамках 39 маршрутов депо «Замоскворецкое» требуется привлечь 156 ММ, а для ТКЛ для обеспечения 37 маршрутов – 148 ММ.

Адаптация ИСП ГР ММ для машинистов Московского Центрального Кольца

Для применения разработанного ИСП ГР ММ в условиях Московского Центрального Кольца (МЦК) проанализированы особенности работы машинистов МЦК. Расхождения в особенностях работы машинистов МЦК и ММ [10] приведены в табл. 4.

В ходе апробации выявленные особенности учитывались путем изменения соответствующих настроек ИСП ГР ММ. На рис. 6 приведены полученные с использованием ИСП ГР ММ результаты решения задачи распределения основных машинистов МЦК по РС с минимальным значением критерия качества (1) для МЦК. При решении использовались 6-и часовые РУ (рис. 2).

На рис. 7 приведено распределение значений среднеквадратичного отклонения при назначении основных машинистов МЦК по РУ для множества решений, в реализации которых задействовано 5 машинистов.



Рис. 7. Столбчатая диаграмма распределения значений критерия (1) по множеству решений, в реализации которых задействовано 5-ь машинистов МЦК, оранжевой линией указано среднее значение критерия

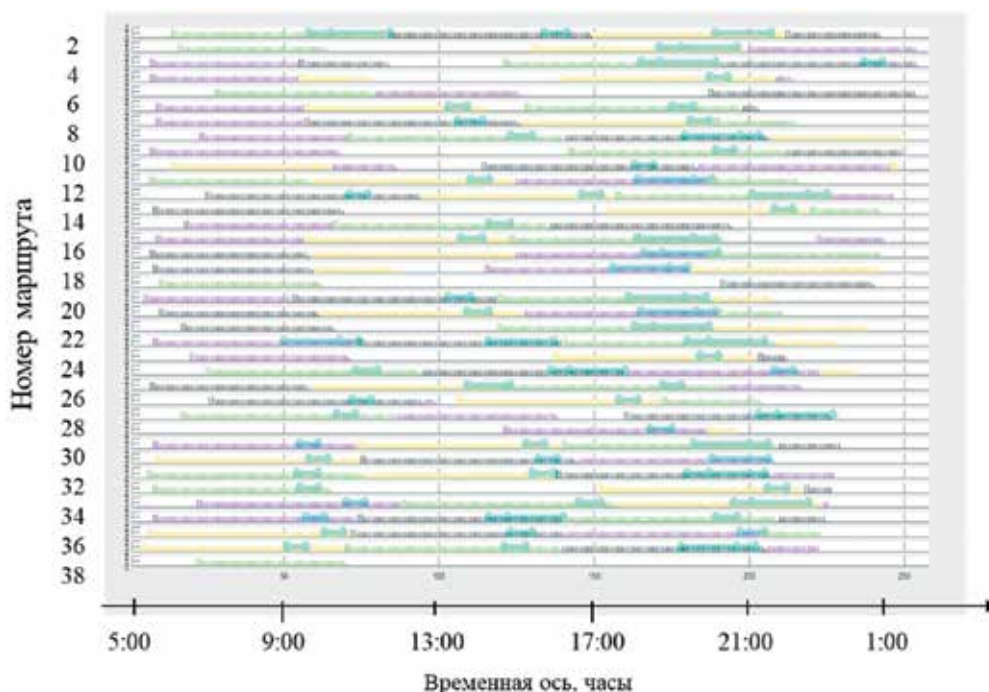


Рис. 8. График работы основных ММ ТКЛ с возможными ОП, сформированный в ИСП ГР ММ
Условные обозначения аналогичны рис. 3, голубым цветом указаны возможности для осуществления подмен, границы возможности обозначены более длинными линиями

Используемый в исследованиях ГО ЭПС на МЦК обслуживает 164 машинистов. В решениях, полученных в помощью ИСП ГР ММ, задействовано 5 машинистов для 44 маршрутов, то есть 220 машинистов для периода планирования в 44 дня (рис. 5).

Решение задачи формирования ГР подменных ММ проводилось с применением алгоритма планирования рабочего времени подменных ММ, исходя из возможностей проведения обеденных перерывов (ОП) основных ММ, описанного в [10].

В соответствии с требованиями к режиму труда и отдыха основных ММ должны быть предусмотрены ОП в их работе [8]. При формировании ГР подменных ММ для линии выбирается станция метро, оборудованная

под проведение ОП для основных ММ. После чего производится анализ ПГД ППМ на предмет выявления возможности проведения ОП, а именно интервалов времени между двумя прибытиями одного и того же маршрута на оборудованную под проведение ОП станцию, на которой основные ММ могут смениться подменными ММ.

Часть промежутков не подходит для проведения ОП по следующим причинам:

- промежуток не удовлетворяет условиям работы основных ММ;
- начало промежутка попадает на конец РУ и отработать осталось менее заданного времени (20 минут), в этом случае проведение ОП считается нецелесообразным;

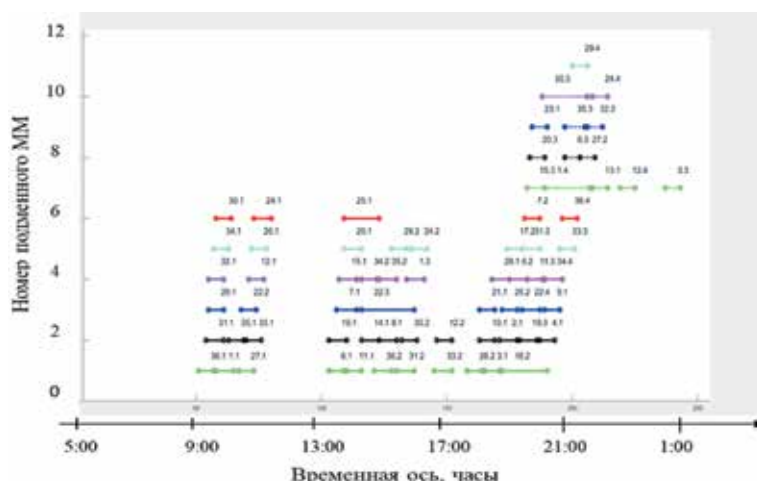


Рис. 9. Полученные с использованием ИСП ГР ММ результаты решения задачи распределения времени работы подменных ММ с минимальным критерием качества (2) для депо «Выхино» ТКЛ

Время работы, час	Время простоя, час
0,5	0
2	0,16
1,66	0,66
1,5	0,66
3,58	1,5
3,25	8,75
4,2	7,8
5,5	6,25
5,5	6,16
6,5	5
6,8	4,8

Табл. 5. Анализ рассмотренных решений задачи формирования ГР подменных ММ и машинистов МЦК

Станция для проведения ОП	Число задействованных маршрутов, шт.	Число задействованных подменных машинистов, чел.	Число РУ для подмен, шт	Число завершённых решений, шт.	Наибольшее значение среднего времени простоя одного машиниста за сутки, час	Лучшие значения показателей эффективности, час		
						Среднее время простоя одного машиниста за сутки	Среднее время работы одного машиниста за сутки	Средняя продолжительность РС одного машиниста за сутки
Автозаводская (ЗЛ)	39	11	43	70	3,8	2,1	4,2	6,3
Кузьминки (ТКЛ)	37	11	68	55	4,7	3,8	3,7	7,5
Андроновка (МЦК)	44	25	98	55	3,9	2,7	5,7	8,4

Табл. 6. Сравнение результатов, полученных с помощью модели и реального графика нарядов сотрудников

Линия		Число основных машинистов в депо	Число подменных машинистов в депо	Суммарное число основных и подменных машинистов в депо	Число РС при переработке машинистов	Относительное сокращение числа задействованных машинистов
ЗМ	Модель	156	15	171	0	28%
	Пример	240			1	
ТКЛ	Модель	148	16	164	0	18%
	Пример	200			2	
МЦК	Модель	220	47	267	0	0%
	Пример	264			1	

– продолжительность РУ (менее 4,5 часов) позволяет не проводить ОП;

– ОП для данного основного ММ уже предоставлялся в текущих сутках.

Для решения задачи формируется дерево возможностей для проведения ОП. Вершины описывают промежутки ОП с указанием времени их начала и окончания, принадлежности к определенному маршруту, номера подменного ММ, который реализует данный ОП [10]. При формировании ГР подменных ММ производится сравнение решений, описанных каждым из путей дерева, и выбирается лучшее согласно следующей формуле:

$$\Delta D = \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^{I-1} \Delta d_{ij} \rightarrow \min, \quad (2)$$

где ΔD – сумма длительностей всех простоев между привлечением к работе подменных ММ в период ОП основных ММ; i – номер одного из I промежутков; j – номер одного из J ММ; Δd_{ij} – промежутки между привлечением ММ (в рамках суток).

На рис. 8 приведен ГР основных ММ ТКЛ с указанными возможностями для ОП (голубым цветом выделены интервалы времени между моментами прибытия маршрутов на станцию Кузьминки по I и II главным путям ТКЛ, на которой возможно проведение ОП). Для сотрудников, работающих в ночную смену, принцип назначения и продолжительность ОП такая же, как и при работе днем [8].

На рис. 9 приведено решение задачи формирования ГР подменных ММ для 37 маршрутов ТКЛ с минимальным из рассмотренных значений критерия качества (2). В условном обозначении каждого из элементов полученного ГР в качестве первой цифры указан номер маршрута, второй – порядковый номер ОП в рамках этого маршрута. Время работы подменных ММ ограничивалось 12-и часами в сутки. При выборе решений учитывалось общее число привлекаемых подменных ММ.

В табл. 5 приведена статистика решений для ЗЛ, ТКЛ и МЦК. Станция для подмены выбирается исходя из ГО ЭПС и времени хода до станции. Используя предложенную модель, можно сравнивать временные затраты на проведение ОП для различных станций линии.

Из табл. 5 видно, что сумма среднего времени простоя и работы каждого машиниста не превышает длительности 12-и часовой РС с учетом времени для проведения ОП. Для оценки числа подменных машинистов, которых необходимо привлечь для реализации ПГД ППМ, учитывается ограничение длительности их работы не более 32-36 рабочих часов в неделю (табл. 4, условие 1). Исходя из этого условия рассчитывается число подменных ММ в депо (табл. 6).

В табл. 6 приводится сравнение общего числа основных и подменных машинистов для данных, полученных с помощью ИСП ГР ММ и реальных данных по загрузке персонала для ЗЛ, ТКЛ и МЦК. Произведен расчёт повышения эффективности использования рабочего времени машинистов с помощью ИСП ГР ММ.

Обсуждение

В приведенных примерах частота пересечения станции, выбранной для проведения ОП, позволяет обеспечить основных ММ перерывами в работе без дополнительных затрат на дорогу к месту нахождения вверенного ему ЭПС. В случае, если время полного оборота на линии не позволяет использовать одну станцию для смены основного и подменного ММ, к времени ОП основного ММ может добавиться время его движения навстречу ЭПС после ОП. При этом возможно использование текущего алгоритма формирования расписания ГР подменных ММ, где в качестве времени окончания элементов перечня потенциальных ОП используется время пересечения нитки графика заданного маршрута с заданной промежуточной станцией, выбранной для смены машинистов. Продолжительность промежутка подмены при этом увеличивается на длительность дороги от станции проведения ОП до места встречи основного ММ с подменным ММ.

Заключение

Основные результаты статьи:

- представленные алгоритмы формирования ГР основных и подменных машинистов для Московского метрополитена и МЦК положены в основу создания ИСП ГР ММ;
- апробация разработанной ИСП ГР ММ продемонстрировала возможность ее использования не только для условий Московского метрополитена, но и МЦК;
- применение созданной ИСП ГР ММ позволит повысить эффективность использования рабочего времени машинистов при построении ГР машинистов на величину, достигающую 28%, за счет автоматизации процесса перебора решений с заданными начальными требованиями и параметрами модели.

Внедрение ИСП ГР ММ повысит производительность труда работников, задействованных в планировании работы локомотивных бригад, позволит формализовать процесса принятия решений при планировании работы локомотивных бригад и оценке результатов планирования, что окажет положительное влияние на качество и безопасность движения, понизит влияние человеческого фактора на процесс планирования работы локомотивных бригад, ускорит процесс обмена информацией между средствами цифровизации ОАО «РЖД», уменьшит количество ошибок, возникающих при передаче информации.

В качестве перспектив развития представленного исследования планируется:

- повышение уровня автоматизации этапа выбора шага разбиения ГО на РУ;
- повышение качества работы моделей, в частности апробация разработанной ИСП ГР ММ на других линиях метрополитена и возможное расширение параметров модели в виду локальных особенностей организации управления движением ЭПС;

– построение совместного ГР основных, подменных и маневровых ММ, при построении которого будет предполагаться, что один машинист может попеременно в течение одной РС выполнять функции более, чем одного типа;

– масштабирование полученного положительного эффекта на другие участки железнодорожных линий.

Библиографический список

1. Кулагин М.А., Маркевич А.В., Сидоренко В.Г. Влияние человеческого фактора на безопасность движения поездов // Труды международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем» – XXVII. М.: ИПУ РАН. 2019. С. 265-270.
2. Финоченко Т.А., Переверзев И.Г., Баланова М.В. Физические факторы, воздействующие на надежность работы машинистов кранов на железнодорожном ходу // Надежность. 2019. Т. 19. № 1(68). С. 36-39.
3. Алиев О.Т. Воздействие вредных и опасных факторов условий труда на машинистов локомотивов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2015. №4 (45). С. 21-28.
4. Баранов Л.А., Сидоренко В.Г., Балакина Е.П. и др. Интеллектуальное централизованное управление движением внеуличного городского железнодорожного транспорта в условиях интенсивного движения // Надежность. 2021. Т. 21. № 2. С. 17-23. DOI: 10.21683/1729-2646-2021-21-2-17-23
5. Свижевский В.А., Стовбур В.А. Современные проблемы гигиенического нормирования физических факторов, воздействующих на персонал и пассажиров метрополитена // Acta Biomedica Scientifica. 2011. № 1-1. С. 273.
6. Гафаров Е.Р., Лазарев А.А. Математические методы оптимизации при составлении учебного расписания // Новые информационные технологии в образовании: сборник научных трудов. М.: IC-Паблишинг, 2013. С. 51.
7. Клеванский Н.Н., Антипов М.А. Формирование транспортных расписаний // Образовательные ресурсы и технологии. 2016. № 4 (16). С. 71–91.
8. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 22.11.2021) (с изм. и доп., вступ. в силу с 30.11.2021): принят Гос. Думой 21 дек. 2001 г.: одобрен Советом Федерации 26 дек. 2001 г. [Электронный ресурс] // Законы, кодексы, нормативные и судебные акты : сайт. Режим доступа: <https://legalacts.ru/kodeks/TK-RF/>
9. Баранов Л.А., Сафронов А.И., Сидоренко В.Г. Планирование движения поездов в интеллектуальных транспортных системах // Надежность. 2022. Т. 22. № 3. С. 35-43. DOI: 10.21683/1729-2646-2022-22-3-35-43
10. Markevich A.V., Sidorenko V.G. Automation of Scheduling for Drivers of the Subway Rolling Stock // 2021 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). IEEE, 2021. Pp. 129–138.

References

1. Kulagin M.A., Markevich A.V., Sidorenko V.G. [The effect of the human factor on the safety of train traffic]. In: [Proceedings of the XXVII International Conference Matters of Safety Management of Complex Systems]. Moscow: ICS RAS; 2019. Pp. 265-270. (in Russ.)
2. Finochenko T.A., Pereverzev I.G., Balanova M.V. Physical factors affecting the reliability of rail crane operators. *Dependability* 2019;19(1):36-39.
3. Aliev O.T. Impact of harmful and dangerous factors of working conditions on locomotive drivers. *Proceedings of Petersburg Transport University* 2015;4(45):21-28. (in Russ.)
4. Baranov L.A., Sidorenko V.G., Balakina E.P. et al. Intelligent centralized traffic management of a rapid transit system under heavy traffic. *Dependability* 2021;21(2):17-23. DOI: 10.21683/1729-2646-2021-21-2-17-23.
5. Svizhevskiy V.A., Stovbur N.N. Modern problems of hygienic standardization of physical factors, influencing staff and passengers in subway. *Acta Biomedica Scientifica* 2011;1(1):273-277. (in Russ.)
6. Gafarov E.R., Lazarev A.A. [Mathematical optimisation methods in the process of curriculum generation]. In: [New information technologies in education: collected papers]. Moscow: IC Publishing; 2013. (in Russ.)
7. Klevansky N.N., Antipov M.A. Transport timetabling problem. *Education Resources and Technologies* 2016;4(16):71-91. (in Russ.)
8. Labour Code of the Russian Federation dated 30.12.2001 N 197-FZ (as amended on 22.11.2021) (version in effect since 30.11.2021): adopted by the State Duma on December 21, 2001: approved by the Federation Council on December 26, 2001. (accessed 04.07.2023). Available at: <https://legalacts.ru/kodeks/TK-RF/>.
9. Baranov L.A., Safronov A.I., Sidorenko V.G. Train traffic planning in intelligent transportation systems. *Dependability* 2022;22(3):35-43. DOI: 10.21683/1729-2646-2022-22-3-35-43. (in Russ.)
10. Markevich A.V., Sidorenko V.G. Automation of Scheduling for Drivers of the Subway Rolling Stock. In: Proceedings of the IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS); 2021. Pp. 129-138.

Сведения об авторах

Маркевич Агата Владимировна – ведущий консультант дирекции ERP Решений ООО «ТЕРРАЛИНК ДЕВЕЛОПМЕНТ», 2-й Южнопортовый пр-д, д. 33 стр. 1, Москва, Российская Федерация, 115088, e-mail: vlaskuk.a@mail.ru

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

About the authors

Agata V. Markevich, Lead Adviser, ERP Solutions Directorate, TERRALINK DEVELOPMENT, 33, bldg 1 2-nd Yuzhnoportovy proyezd, Moscow, 115088, Russian Federation, e-mail: vlaskuk.a@mail.ru.

Valentina G. Sidorenko, Doctor of Engineering, Professor, Chair Professor, Department of Management and Protection of Information, RUT (MIIT), 9b9 Obrazcova St., Moscow, 127994, Russian Federation, e-mail: valenfalk@mail.ru.

Вклад авторов в статью

Маркевич А.В. Выполнен анализ литературы по теме исследования. Разработаны, реализованы в ИСП ГР ММ и апробированы для реальных условий городских рельсовых транспортных систем рекурсивные алгоритмы формирования ГР основных ММ и подменных ММ во время проведения ОП основным ММ, направленные на сокращение числа машинистов, задействованных в реализации заданного планового графика движения поездов, повышение равномерности чередования периодов труда и отдыха машинистов, а также сокращение длительности простоев в работе внутри рабочих смен.

Сидоренко В.Г. Проанализированы результаты апробация разработанного ИСП ГР ММ, даны рекомендации по его применению.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Факторы надежности программного обеспечения микропроцессорных защит¹

Dependability factors of microprocessor protection software

Успенский М.И.
Uspensky M.I.

Институт социально-экономических и энергетических проблем Севера, Сыктывкар, Коми НЦ УрО РАН
Institute for Socioeconomic and Energy-Related Problems of the North, Syktывkar, Komi Science Centre, Urals Division, Russian Academy of Sciences
uspensky@energy.komisc.ru



Успенский М.И.

Резюме. Цель. Анализ особенностей надежности функционирования программ, характерных для критически важных приложений, работающих в режиме реального времени, применительно к микропроцессорным защитами. К числу основных характеристик функционирования релейных защит относятся показатели надежности. С переходом исполнения таких защит на микропроцессорную основу кроме аппаратной надежности возникла необходимость характеризовать ее функционирование и надежностью программного обеспечения. Важность решаемых ею задач в процессе эксплуатации относит ее к программам, используемым в критически важных приложениях и работающим в реальном режиме. Это, в свою очередь, ужесточает требования к оценке их надежности. **Методы.** Сравнительный анализ позволил оценить общность рассмотренных факторов надежности функционирования программного обеспечения рассматриваемых приложений, и в то же время выделить некоторые особенности, характерные для исполнения релейной защиты на микропроцессорах. **Результаты.** Приведен пример подобной оценки, показывающий, что при всех сложностях полного тестирования программ микропроцессорной защиты вклад ошибок в программах пока составляет 2,5% от общего вклада. **Заключение.** Показано, что программы микропроцессорных защит относятся к программам критически важных приложений, работающих в режиме реального времени, что позволяет использовать опыт и характеристики такого программного обеспечения при решении задач релейной защиты. Тем не менее, приведены некоторые особенности, характерные именно для релейной защиты на микропроцессорной основе. Определены дальнейшие задачи.

Abstract. Aim. An analysis of the distinctive features of the functional dependability of software that are common to critical real-time applications in respect to microprocessor protections. Dependability indicators are among the primary operational characteristics of relay protection. As such protections migrate to microprocessor technology, it became necessary to characterise their operation and dependability with software dependability along the hardware dependability. The importance of the tasks it solves in the process of operation puts it into the category of programs used in critical real-time applications. That, in turn, toughens the requirements for their dependability evaluation. **Methods.** The comparative analysis allowed evaluating the unity of the examined operational dependability factors of the software as part of the examined applications, while identifying certain distinctive features that are common to relay protections that use microprocessors. **Results.** The paper provides an example of such estimation that shows that, given all the complexity of testing microprocessor protection programs, the contribution of software errors still is 2,5% from the overall contribution. **Conclusion.** It is shown that microprocessor protection programs fall into the category of critical real-time application programs, which allows using the experience and characteristics of such software as part of relay protection. Nevertheless, the paper cites certain distinctive features that are common only to microprocessor-based relay protection. Further tasks are specified.

Ключевые слова: программы критически важных приложений, микропроцессорные релейные защиты, надежность программного обеспечения.

Keywords: critical application software, microprocessor relay protection, software dependability.

Для цитирования: Успенский М.И. Факторы надежности программного обеспечения микропроцессорных защит // Надежность. 2023. №3. С. 73-77. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-3-73-77>

¹ M.I. Uspensky. "SOFTWARE CONTRIBUTION TO THE AVAILABILITY OF MICROPROCESSOR-BASED RELAY PROTECTION" Reliability: Theory & Applications, vol. 17, no. 3 (69), 2022, pp. 31-39. DOI: 10.24412/1932-2321-2022-369-31-39

For citation: *Uspensky M.I. Dependability factors of microprocessor protection software. Dependability 20023;3:73-77. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-3-73-77>*

Поступила: 20.02.2023 / **После доработки:** 28.06.2023 / **К печати:** 15.09.2023

Received on: 20.02.2023 / **Revised on:** 28.06.2023 / **For printing:** 15.09.2023

1. Введение

В последнее время программистами большое внимание уделяется оценке надежности функционирования программ, используемых в критически важных приложениях и работающих в режиме реального времени. Среди целого круга таких программ, выполняющих важные функции на атомных станциях, военном оборудовании и т.п., большая доля их участвует в управлении и защите электрооборудования электроэнергетических систем (ЭЭС). От такого программного обеспечения (ПО) требуется высокая надежность выполнения своих функций.

В инженерном сообществе программные системы имеют репутацию неустойчивых. Известны случаи, когда ошибка программистов приводила к крупным авариям с большими финансовыми ущербами. Так, 14.08.2013 г. на восточном побережье США 55 млн человек оказались без электричества, потому что оператор ЭЭС отключил сработавший сигнал о нарушении, чтобы не мешал работать, исправил режим и забыл включить сигнал, а программа не напомнила об этом, и следующее нарушение режима привело к крупной аварии, поскольку сигнала о нем не поступило. Из-за того, что проектировщики забыли о возможности пересечения линии перемены дат, 12 истребителей, направлявшихся из США в Окинаву, потеряли доступ к данным о количестве топлива, датчикам скорости и высоты, частично нарушилась связь. В течение нескольких часов самые современные истребители Америки F-22 Raptor летели через океан совершенно беспомощными. В конце концов, их удалось посадить только благодаря мастерству пилотов. И подобных примеров сотни.

2. Специфика программ критически важных приложений

Почему же инженеры не избегают ПО, коль оно не заслуживает доверия? Обычно отмечают три основных преимущества замены аппаратного обеспечения программным:

1. Технология ПО позволяет встраивать в систему больше логики. Компьютерные системы с программным управлением могут различать большое количество ситуаций и выдавать выходные данные, соответствующие каждой из них. Системы с жесткой логикой не могли бы добиться такого поведения без непомерно большого количества аппаратных средств. Программируемое оборудование стоит дешевле, чем эквивалентная жестко связанная логика, потому что оно имеет регулярную структуру и производится массово. Экономические аспекты ситуации также позволяют системам с про-

граммным управлением выполнять больше проверок; надежность может быть увеличена за счет периодического выполнения программ, проверяющих аппаратуру.

С другой стороны, стоимость написания и сертификации действительно надежного ПО очень высока; к тому же необходимо принимать во внимание затраты на сопровождение – опять же такое, которое не подрывает надежности и безопасности. Показательный пример: только сопровождение относительно простого и не очень большого по объему (около 400 тыс. слов) ПО для бортового компьютера, установленного на американском космическом корабле типа Shuttle [1], стоил NASA 100 млн долл. год.

2. Логику, реализованную в ПО, теоретически легче изменить, чем логику, реализованную в аппаратном обеспечении. Многие изменения могут быть сделаны без добавления новых компонентов. Если система тиражируется или находится в труднодоступном физическом месте, гораздо проще внести изменения в ПО, чем в аппаратное обеспечение.

С другой стороны, изменения в программных модулях легко выполнить технически, однако трудно сделать это без внесения новых ошибок. Необходимые для гарантий безопасности верификация и сертификация означают новые большие затраты. К тому же, чем длиннее время жизни программы, тем более возрастает опасность вместе с изменениями внести ошибки – например, потому, что некоторые разработчики с течением времени перестают быть таковыми, а документация редко является исчерпывающей. Между тем, масштабы изменений в ПО могут быть весьма велики. Например, ПО для космических кораблей типа Shuttle за 10 лет сопровождения, начиная с 1980 г., подверглось 14-ти модификациям, приведшим к изменению 152 тысяч строк кода (полный объем ПО – 400 тысяч строк). Необходимость модернизации ПО диктовалась периодическим обновлением аппаратной базы, добавлением функциональности, а также происходило по причине необходимости исправления выявленных дефектов.

3. Компьютерные технологии и гибкость ПО позволяют предоставлять операторам больше информации и предоставлять ее в более полезной форме. Оператору современной системы с программным управлением может быть предоставлена информация, которая была бы немыслима в чисто аппаратной системе. Все это может быть достигнуто при использовании меньшего пространства и мощности, чем использовалось в некомпьютеризированных системах [2].

Рассматривая надежность относительно ПО следует помнить, что:

- самое очевидное различие между программными и аппаратными технологиями – это их *сложность*. Так,

точная документация в достаточно общей нотации для небольших программных систем может заполнить книжный шкаф, тогда как для аппарата достаточно несколько схем и краткого описания. Другим показателем сложности является время, которое требуется программисту для близкого знакомства с системой. Даже в небольших программных системах часто бывает так, что программисту требуется год работы с программой, прежде чем ему можно будет доверить самостоятельное внесение улучшений;

- следующее примечательное свойство ПО – *чувствительность к небольшим ошибкам*. В обычном машиностроении каждое конструктивное и производственное измерение может быть охарактеризовано допуском. От человека не требуется точного соответствия; достаточно быть в пределах установленного допуска на нужное значение. Использование допусков оправдано предположением, что небольшие ошибки имеют небольшие последствия. Хорошо известно, что в ПО тривиальные канцелярские ошибки могут иметь серьезнейшие последствия. Для ПО не известна полезная интерпретация допуска. Одна пунктуационная ошибка может быть катастрофической, даже если фундаментальные оплошности иногда имеют незначительные последствия;

- ПО, как известно, трудно поддается *адекватному тестированию*. Часто бывает, что часть ПО, подвергнутая тщательному и дисциплинированному тестированию, имеет серьезные недостатки. Тестирование аналоговых устройств основано на интерполяции. Предполагается, что устройства, которые хорошо работают в двух близких точках, будут хорошо работать и в промежуточных точках. В ПО такое предположение неверно. Количество случаев, которые должны быть протестированы для того, чтобы вызвать доверие к ПО, обычно очень велико;

- многие из предположений, которые обычно делаются при проектировании высоконадежного оборудования, недействительны для ПО. Разработчики высоконадежного оборудования озабочены производственными отказами и явлениями износа. Они могут проводить свой анализ, исходя из предположения, что отказы не сильно коррелируют, а одновременные отказы маловероятны. Те, кто оценивает надежность аппаратных систем, должны были бы быть обеспокоены ошибками проектирования и *коррелированными отказами*; однако во многих ситуациях влияние других типов ошибок является доминирующим. В ПО мало ошибок, вносимых на этапе производства (компиляции); когда такие ошибки есть, они носят систематический, а не случайный характер. ПО не изнашивается. Ошибки, с которыми должны быть связаны специалисты по надежности ПО, – это ошибки проектирования. Эти ошибки нельзя считать статистически независимыми. Существует множество доказательств того, что даже когда программы для данной задачи пишут люди, не знающие друг друга, они имеют тесно связанные ошибки [3, 4].

Эти свойства являются фундаментальным следствием того факта, что математические функции, реализуемые ПО, являются не непрерывными функциями, а функциями с произвольным числом разрывов. Отсутствие ограничений непрерывности на функции, описывающие программные эффекты, затрудняет нахождение компактных описаний ПО. Отсутствие таких ограничений придает ПО гибкость, но также и сложность. Аналогично, чувствительность к небольшим ошибкам и трудности тестирования можно отнести к фундаментальным математическим свойствам; вряд ли удастся найти чудодейственное лекарство. Для программных систем, критичных к надежности, всегда будет требоваться большая дисциплина и тщательный контроль.

В отличие от ситуации с аппаратными системами, нельзя добиться более высокой надежности путем дублирования программных компонентов. Просто дублируются ошибки. Даже если программы пишутся независимо друг от друга, ошибки, допущенные одним программистом, часто разделяются другими. В результате нельзя рассчитывать на повышение надежности программных систем только за счет наличия трех компьютеров там, где достаточно одного, хотя и здесь все не так просто.

Уместно напомнить, что в практике разработки и использования ПО огромное значение решению проблемы его безопасности отводится исполнением ряда стандартов серии ГОСТ Р МЭК 61508-N-2012 «Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью», где $N = 1, \dots, 4$. Эта серия детализирует цели и требования при управлении безопасностью функционирования, в том числе, программируемых систем. Но фактическое наполнение этих требований остается за разработчиками ПО.

3. Особенности программ микропроцессорных защит

Рассмотрим приложение перечисленных выше свойств и особенностей к программам микропроцессорной защиты, которые также относятся к программным системам, критичным к надежности.

Прикладные программные модули релейной защиты отличаются сравнительно небольшим объемом программ (в среднем 3-5 тыс. строк в ассемблерном эквиваленте), что определяется, прежде всего, требованиями к быстродействию защиты. С другой стороны, такие объемы создают хорошую обозреваемость текста программы, что снижает появление ошибок при проектировании. Сюда же можно отнести то, что в ряде случаев такие прикладные программы готовятся на языках программируемых логических контроллеров (ПЛК) [5], что также позволяет снизить вероятность программной ошибки. Однако операционная среда пишется на более традиционных для ПО языках, например, Си, Ява и т.п.

Другой характерный момент этих модулей связан с тем, что то или иное нарушение режима компонентов ЭЭС может быть выявлено различными способами на основе одних и тех же входных данных и нередко на разных микропроцессорах. В традиционной защите такой подход известен как резервирование. В микропроцессорной защите он позволяет дублировать ПО при обработке входных данных, поскольку алгоритмы их обработки не повторяются. В результате при такой организации в определенной степени ослабляется ограничение по дублированию программ, поскольку подобная организация их работы – скорее резервирование, чем дублирование, хотя при моделировании надежности они включаются параллельно с точки зрения выполнения задачи (выявления недопустимого режима). Конечно, и здесь каждая из программ может иметь свои не выявленные и не похожие между собой ошибки, но это уже ближе к дублированию аппаратной части защиты.

И, конечно же, важно, чтобы система защиты не загружалась какими-либо вспомогательными фоновыми задачами, которые могут стать источником ошибок и сбойных ситуаций. Она должна быть максимально автономной, если мы считаем ее критически важным приложением. Стремление к объединению нескольких задач защиты на одном процессоре приводит к росту объема ПО, следовательно, к худшей обозреваемости программ, а отсюда и к увеличению вероятности программных ошибок.

Таким образом, различные вероятностные оценки показателей надежности функционирования ПО релейной защиты, подобные оценкам аппаратной части, дают только качественную картину в довольно широком диапазоне. О количественной оценке можно судить только из статистики, которая появляется через годы эксплуатации значительного числа устройств.

Так, по статистическим данным [6] количество микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики (РЗА), находящихся в работе, в 2013 г. составило 274062 устройств, а в 2014 г. – 319912 устройств (табл. 4, [6]). Из данных [7] «Распределение случаев неправильной работы устройств РЗА по видам технических причин и типам устройств РЗА за период с 01.01.2020 по 30.06.2020» известно, что из 727 случаев отказа РЗА 29 случаев связаны с отказом аппаратной части микропроцессорных защит, а 18 случаев – с отказом или сбоем их ПО. Тогда прогнозное число устройств РЗА на 2020 год по отношению к 2013 году (за 7 лет) может составить из формулы

$$a_n = a_1(1+r)^n$$

при $r = (a_2 - a_1)/a_1$, где a_1 – число устройств первого года, a_n – число устройств на год n , r – средний годовой прирост устройств,

$$a_7 = 274062 \left(1 + \frac{319912 - 274062}{274062} \right)^7 = 809321 \text{ устр.}$$

Примем долю РЗА «Россети» в 70 % от всех устройств в [7]. Тогда грубая оценка интенсивности отказов

$$\lambda = \frac{m}{0,7 \cdot Nt} = \frac{18 \cdot 2}{0,7 \cdot 809321} = 6,35 \cdot 10^{-5} \text{ лет}^{-1}. \text{ Здесь } m -$$

число отказов устройств из-за ПО, за полгода (2 в числителе), $0,7 \cdot N$ – число всех микропроцессорных защит, t – расчетный срок (год). При времени восстановления

$$t_e = 2 \text{ ч } (\lambda = \frac{m}{0,7 \cdot Nt} = \frac{18 \cdot 2}{0,7 \cdot 809321} = 6,35 \cdot 10^{-5}$$

лет^{-1}) коэффициент готовности ПО

$$K_{гн} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{4380}{6,35 \cdot 10^{-5} + 4380} = 0,999999985. \text{ А средняя}$$

наработка до ошибки $t_{\Sigma} = \frac{1}{\lambda} = 15748 \text{ лет. Из соотноше-}$

$$\text{ния } d_{по} = \frac{m_{по}}{m_{по} + m_{прч}} \cdot 100\% = \frac{18}{727} \cdot 100\% \approx 2,5\%, \text{ где}$$

$m_{по} + m_{прч} = 727$ случаев неправильной работы микропроцессорных защит, где $m_{прч}$ – число случаев неправильной работы защиты, не связанное с программным обеспечением. Отметим, что доля отказов из-за программных ошибок составила 2,5%.

4. Заключение

Программы микропроцессорных защит относятся к программам критически важных приложений, работающих в режиме реального времени, и поэтому от них требуется высокая надежность выполнения своих функций. Учитывая развитие и широкое применение компьютерных технологий и гибкость программного обеспечения микропроцессорных защит, нельзя забывать о сложности их описания, чувствительности даже к малым отклонениям от основного алгоритма, о проблемах тестирования, связанных с отсутствием ограничений непрерывности функций программ, описывающих алгоритмы решений, что не способствует разработке проектов с ошибками, мало влияющими на исполнение требуемых функций.

Есть ряд свойств у этих программ, способствующих улучшению их показателей надежности, таких как краткость, языки программируемых логических контроллеров, но этого недостаточно для решения проблем надежности программ микропроцессорной защиты, как программ, критически важных приложений. С другой стороны, необходима достаточная автономность отдельных устройств защит, ибо стремление к комплексности часто снижает параметры надежности защиты. Здесь следует искать оптимальные решения, учитывающие как функциональные возможности программируемых защит, так и достижение требуемых характеристик надежности исполнения этих функций.

Работа выполнена в рамках темы АААА-А20-120051590026-3 «Модели и методы адаптации систем энергетики в современных условиях».

Библиографический список

1. An Assessment of Space Shuttle Flight Software Development processes. – Committee for Review of Oversight Mechanisms for Space Shuttle Flight Software Development Processes, National Research Council, 1993. 206 p. URL: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19930019745/downloads/19930019745.pdf> (дата обращения 15.06.2023).
2. Parnas D.L., Schouwen A.J., Kwan S.P. Evaluation of Safety-Critical Software // *Communications of the ACM*. 1990, Vol. 33, No. 6. Pp. 636-648.
3. Bishop P.G., Pullen F.D. Error Masking: A Source of Failure Dependency in Multi-Version Programs / 1991, January. 17 p. DOI: 10.1007/978-3-7091-9123-1.3
4. Eckhardt D.E. et al. An experimental evaluation of software redundancy as a strategy for improving reliability / D.E. Eckhardt A.K. Caglayan J.C. Knight L.D. Lee D.F. McAllister J.P.J. Kelly // *IEEE Transactions on Software Engineering*. Vol.17, Is.7, 1991. Pp. 692-702. DOI: 10.1109/32.83905
5. Лившиц Ю. Е. Программируемые логические контроллеры для управления технологическими процессами. Минск: БНТУ, 2014. Ч. 1. 206 с.
6. Концепция развития релейной защиты и автоматики электросетевого комплекса // Приложение № 1 к протоколу Правления ОАО «Россети» от 22.06.2015 № 356пр. М., 2015. 49 с. URL: <https://mig-energo.ru/wp-content/uploads/2015/12/rza-fsk.pdf> (дата обращения 15.06.2023).
7. Распределение случаев неправильной работы устройств РЗА по видам технических причин и типам устройств РЗА за период с 01.01.2020 по 30.06.2020. URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/rza/rza_rez_info/rza_rez_vid_teh_1-2k2020.xl (дата обращения 15.06.2023).

References

1. An Assessment of Space Shuttle Flight Software Development processes. Committee for Review of Oversight Mechanisms for Space Shuttle Flight Software Development Processes, National Research Council; 1993. (accessed 15.06.2023). Available at: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19930019745/downloads/19930019745.pdf>.
2. Parnas D.L., Schouwen A.J., Kwan S.P. Evaluation of Safety-Critical Software. *Communications of the ACM* 1990;33(6):636-648.
3. Bishop P.G., Pullen F.D. Error Masking: A Source of Failure Dependency in Multi-Version Programs; 1991. DOI: 10.1007/978-3-7091-9123-1.3.

4. Eckhardt D.E., Caglayan A.K., Knight J.C., Lee L.D., McAllister D.F., Kelly J.P.J. An experimental evaluation of software redundancy as a strategy for improving reliability. *IEEE Transactions on Software Engineering* 1991;17(7):692-702. DOI: 10.1109/32.83905.

5. Livshits Yu.E. [Programmable logic controllers for process control. Part 1]. Minsk: BNTU; 2014.

6. [Concept for the development of relay protection and automatic equipment of the integrated power grid. Annex 1 to the Minutes of meeting of the Rosseti Executive Board no. 356 dated 22.06.2015].

7. [Distribution of RPAE malfunctions by the types of technical causes and types of RPAE devices for the period between 01.01.2020 and 30.06.2020]. (accessed 15.06.2023). Available at: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/rza/rza_rez_info/rza_rez_vid_teh_1-2k2020.xl.

Сведения об авторе

Успенский Михаил Игоревич – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории электрических систем Института социально-экономических и энергетических проблем Севера Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, ул. Коммунистическая, д. 26, Сыктывкар, Республика Коми, Российская Федерация 167982, e-mail: uspensky@energy.komisc.ru

About the author

Mikhail I. Uspensky, Candidate of Engineering, Lead Researcher, Laboratory for Electrical Systems, Institute for Socioeconomic and Energy-Related Problems of the North, Komi Science Centre, Urals Division, Russian Academy of Sciences, 26 Kommunisticheskaya St., Syktyvkar, 167982, Komi Republic, Russian Federation, e-mail: uspensky@energy.komisc.ru.

Вклад автора

Вклад автора состоит в приложении понятий критически важного программного обеспечения к системам микропроцессорной защиты и автоматики с выделением особенностей последних для правильного использования опыта эксплуатации критического программного обеспечения в устройствах релейной защиты и автоматики.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.



Azerbaijan State
Marine Academy



Politecnico di Milano,
Italy



European Safety and
Reliability Association



City University of Hong Kong



Gredenko Forum
International Group
on Reliability, the USA



Qingdao University
China

THE FIFTH EURASIAN RISK 2023 CONFERENCE

JOINTLY ORGANIZED BY



AMIR TECHNICAL
SERVICES LLC

www.eurasianrisk2023.com

ОРГАНИЗАТОРЫ

- Международная компания организатор мероприятий AMIR Technical Services
- Азербайджанская Государственная Морская Академия
- Politecnico di Milano, Italy
- City University of Hong Kong
- International Group on Reliability - Gredenko Forum, USA
- European Safety and Reliability Association (ESRA)
- Qingdao University, China

ОБСУЖДАЕМЫЕ ПРОБЛЕМЫ

- Оценка, анализ и управление рисками
- Функциональная безопасность и надежность
- Промышленные риски в нефтегазовом секторе
- Стихийные бедствия, EWS, экосистемы, загрязнение и принятие решений
- Человеческий фактор и устойчивость
- Каскадные риски и мультидисциплинарные расследования

КЛЮЧЕВЫЕ ДАТЫ

Окончание регистрации и приема статей	12 августа 2023 г.
Объявление программы	18 сентября 2023 г.
Конференция	17-19 октября 2023 г.
Гала-банкет в честь участников	18 октября 2023 г.

Рабочие языки конференции: английский и русский. Будет доступен синхронный перевод докладов. Статьи объемом до 8 страниц принимаются только на английском языке. Правила оформления представлены на сайте конференции. Все статьи в обязательном порядке проходят рецензирование. Отобранные статьи будут опубликованы в изданиях, индексируемых международной базой Scopus и Web of Science. Один автор может представить в качестве докладчика не более двух статей. Регистрационные заявки (форма регистрационной заявки размещена на сайте) и статьи следует отправлять на электронный адрес председателя конференции: prof.vugar.aliyev@gmail.com.

По любым вопросам, связанным с участием в конференции, обращайтесь к организаторам:

E-mail: prof.vugar.aliyev@gmail.com
Mobile: +99450 212 55 45 (WhatsApp)

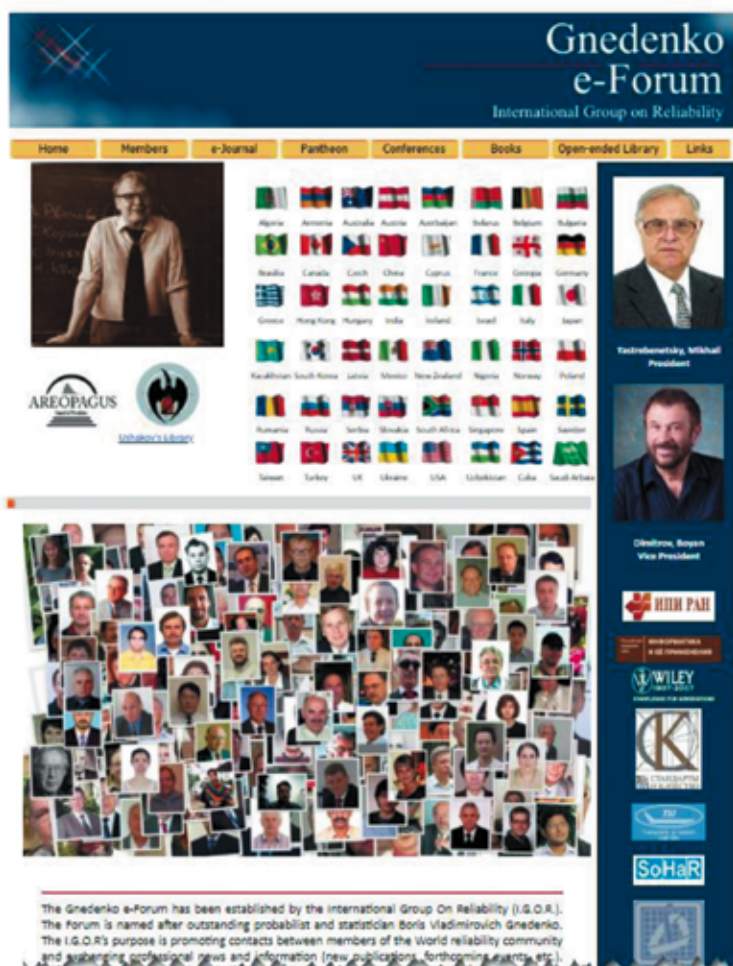
AMIR Technical Services LLC





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). Журнал зарегистрирован в Библиотеке Конгресса США (ISSN 1932-2321) и публикует статьи, критические обзоры, воспоминания, информацию и библиографии на теоретические и прикладные аспекты надёжности, безопасности, живучести, технического обслуживания и методы анализа и управления рисками.

С 2017 года журнал индексируется в международной базе Scopus.



Членство в GNEDENKO FORUM не подразумевает никаких обязательств. Достаточно прислать по адресу a.bochkov@gmail.com свою фотографию и краткую профессиональную биографию (резюме). Образцы можно найти на <http://www.gnedenko.net/personalities.htm>

www.gnedenko.net

GUIDELINES FOR PUBLICATION IN THE JOURNAL «DEPENDABILITY»

STRUCTURAL DEPENDABILITY THEORY AND PRACTICE

- Methods of calculation, technology and methods of simulation, application software packages, practical calculations of complex systems dependability.
- Mathematical theory of maintenance, practical results of complex systems operation, system lifecycle, optimization of dependability and costs at all lifecycle stages.
- Test methods, criteria of test-based decision-making, accelerated testing, methods of test-based dependability assessment of systems, practical experience of dependability testing.

FUNCTIONAL DEPENDABILITY THEORY AND PRACTICE

- Object, subject and purposes of research, functional dependability indicators, terminology, principles and methods of calculation.
- Methods of assessment and prediction of software dependability, methods of calculation of information processes reliability in hardware and software systems subject to faults, software/operator/input information errors.
- Technology and methods of functional dependability: technology of functionally dependable software design, methods of design of fault-tolerant and operator error-tolerant information processing and management algorithms, methods and ways of protection against input information errors, practical results.

FUNCTIONAL SAFETY OF SYSTEMS THEORY AND PRACTICE

- Object, subject and purposes of research, functional safety indicators; safety functions, safety integrity, functional safety terminology.
- Mathematical methods and models of requirements definition for safety integrity and allowable time of hazardous failure detection, functional safety models of multichannel and multilevel systems.
- Technologies for ensuring functional safety of systems at all lifecycle stages.

FAULT TOLERANCE OF SYSTEMS THEORY AND PRACTICE

- Methods of passive failure protection, mathematical models of structural redundancy, gradual degradation of redundant systems, fault masking, practical results of application of passive failure protection.

- Methods of active protection against structural failures and information process errors, principles and methods of active protection, theoretical foundations of active protection, technical solutions, efficiency assessment of active protection.

RISK MANAGEMENT THEORY AND PRACTICE

- Postulates and principles of safety. Safety case. Methods and practical results of hazard ranking.
- Classification of item risks. Principles and methods of risk assessment. Risk assessment tools. Methods of acceptable risk levels definition. Risk management methodology. Management of operational, technology-related, fire, occupational, environmental risks.
- Integral risks. Methods and models of identification of integral risks of systems. Integral risks of processes. Integral risks of services.

CERTIFICATION AND STANDARDIZATION THEORY AND PRACTICE

- Accreditation of certification bodies and test laboratories, state of the art in Russia and other countries. How to achieve mutual recognition of test results in Russia and other countries? Methods of certification of hardware and software systems for compliance with international functional safety standards.
- Mandatory and voluntary certifications: experience, opinions, suggestions.
- Certification of system quality and dependability: regulatory requirements, testing procedures, practical results.
- Effect of the law On Technical Regulation on the development of the theory and practice of dependability and functional safety.
- State of the art and development trends of standardization of dependability, fault tolerance and survivability, functional safety and risk management.

INNOVATIVE TECHNOLOGY OF DEPENDABILITY AND SAFETY THEORY AND PRACTICE

- Application of artificial intelligence-based methods in dependability and safety.
- Methods and models of Data Science.
- Algorithms of prediction of failures and hazardous events using Data Science.
- Methods of proactive dependability and safety management.

ЗАЯВКА НА ПОДПИСКУ НА ЖУРНАЛ «НАДЕЖНОСТЬ»

с № _____ 20__ г. по № _____ 20__ г., количество экз. _____

Полное наименование организации	
Юридический адрес предприятия (индекс, страна, адрес)	
Почтовый адрес предприятия (индекс, страна, адрес)	
ИНН/КПП	
Расчетный счет	
Банк	
Корреспондентский счет	
БИК	
Контактное лицо: Ф.И.О., должность	
Телефон/факс, e-mail	

Реквизиты: ООО «Журнал «Надежность»

Адрес редакции: 109029, г. Москва, ул. Нижегородская, д.27, стр.1, оф. 209

Тел./факс: (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.

Стоимость годовой подписки 4180-00 руб, в т.ч. НДС 10%.

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.¹, Петров В.В.^{2*}

Anna A. Ivanova, Victor V. Petrov

3) Место работы автора (авторов)

Место работы авторов приводится на русском языке, перед указанием места набирается верхним индексом (надстрочным) соответствующая цифра сноски, указывающая на имя автора.

Оформление: Текст места работы набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, межстрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный». Каждое место работы – с новой строки, точки в конце не ставятся.

Пример:

¹Московский государственный университет, Российская Федерация, Москва

²Санкт-Петербургский институт теплоэнергетики, Российская Федерация, Санкт-Петербург

4) Адрес электронной почты автора, который будет вести переписку с редакцией

Оформление: Текст адреса набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, межстрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный», все символы – строчные. Перед адресом набирается символ сноски «*». Точка в конце не ставится.

Пример:

*petrov_vv@aaa.ru

5) Резюме статьи

Данный структурный элемент включает структурированную аннотацию статьи объемом не менее 350 слов и не более 400 слов. Резюме представляется на русском и английском языках. Резюме должно содержать (желательно в явной форме) следующие разделы: Цель; Методы; Результаты; Выводы (на англ. яз.: Objective, Methods, Results, Conclusion). В резюме статьи не следует включать впервые введенные термины, аббревиатуры (за исключением общеизвестных), ссылки на литературу.

Оформление: Текст резюме набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный», кроме слов «**Резюме.**», «**Цель.**», «**Методы.**», «**Выводы.**» («**Objective.**», «**Methods.**», «**Results.**», «**Conclusion.**»), которые (вместе с точкой) должны иметь начертание шрифта «полужирный». Текст резюме на отдельные абзацы не разделяется (набирается в один абзац).

Пример (на рус. яз.):

Резюме. Цель. Предложить подход ... с учетом современных методик. **Методы.** В статье применяются методы математического анализа, ..., теории вероятностей. **Результаты.** С использованием предложенного метода получено... **Заключение.** Предлагаемый в статье подход позволяет...

6) Ключевые слова

Указывается 5-7 слов по теме статьи. Желательно, чтобы ключевые слова дополняли резюме (аннотацию) и название статьи. Ключевые слова указываются на русском и английском языках.

Оформление: Текст набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный», кроме слов «**Ключевые слова:**» («**Keywords:**») которые (вместе с двоеточием) должны иметь начертание «полужирный». Текст на отдельные абзацы не разделяется (набирается в один абзац). В конце ставится точка.

Пример (на рус. яз.):

Ключевые слова: надежность, функциональная безопасность, технические системы, управление рисками, производственная 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 делается отсылка, нумеруются арабскими цифрами, по порядку следования в тексте.

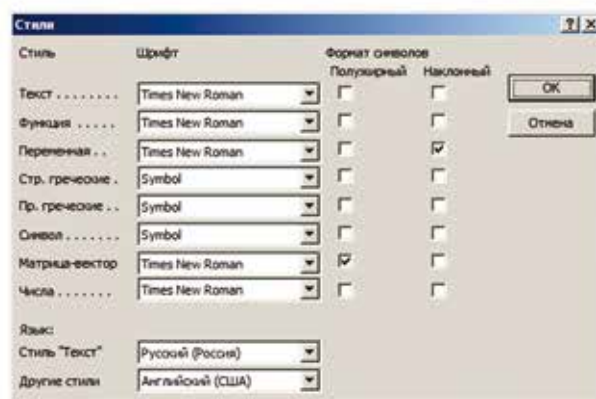
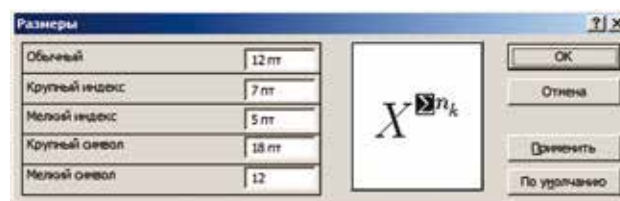
Простые формулы следует набирать без применения формульного редактора (использовать в MS Word русские и латинские буквы, а также меню «Вставка» + «Символ», если требуются греческие буквы и математические операторы), с соблюдением требуемого наклона для латинских символов, например:

$$\Omega = a + b \cdot \theta.$$

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».

ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ ПРИ УЧАСТИИ И ПОДДЕРЖКЕ

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



АО «НИИАС» – ведущее предприятие ОАО «РЖД» в области создания комплексов и систем обеспечения безопасности движения, управления движением, геоинформационного обеспечения, мониторинга состояния подвижного состава и инфраструктуры железных дорог



Цели:

- ☐ эффективность
- ☐ безопасность
- ☐ надежность перевозок



Основные направления деятельности

- Интеллектуальные системы управления
- Технологии управления перевозками и транспортного обслуживания
- Системы автоматики и телемеханики
- Центры автоматизированного управления
- Информационные системы
- Геоинформационные системы и спутниковые технологии
- Системы транспортной безопасности
- Системы управления инфраструктурой
- Системы управления топливно-энергетическими ресурсами
- Испытания, сертификация и экспертиза
- Информационная безопасность
- Нормативно-правовое обеспечение



www.niias.ru