

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор:

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

Заместители главного редактора:

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

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

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

Технический редактор:

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

Председатель редакционного совета:

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

Сопредседатель редакционного совета:

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

УЧРЕДИТЕЛИ ЖУРНАЛА:

АО «НИИАС», ОПЖТ,
Шубинский И.Б.

Зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

*Регистрационное свидетельство
ПИ № ФС77-46055 от 05 августа 2011 года.*

Официальный печатный орган Российской академии надежности

Издатель журнала

ООО «Журнал «Надежность»
Генеральный директор

Саламатин Д.А.

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

ООО «Журнал «Надежность»
www.dependability.ru

Отпечатано в ООО «Отмара. нет». 107140,
г. Москва, ул. Русаковская, д. 13, стр. 5,
2 этаж, пом. III/6-7

Подписано в печать 15.08.2024

Объем 92, Тираж 500 экз, Заказ № 19620
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»)

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

Рубрики журнала

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

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

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

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

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

Журнал «Надёжность» входит в категорию K2 перечня рецензируемых научных изданий ВАК, принятого в соответствии с рекомендацией Высшей аттестационной комиссии при Минобрнауки России от 21 декабря 2023 № 3-пл/1 «О категорировании перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук»

СОДЕРЖАНИЕ

Вопросы автоматизации и управления процессами на транспорте

Дежков М.А., Тарасов К.А., Чернин М.А. Увеличение пропускных и провозных способностей Восточного полигона с помощью использования передовых систем интервального регулирования движения поездов..... 3

Применение искусственного интеллекта в задачах надёжности и безопасности

Романова А.С. Начала законодательства для автономных систем искусственного интеллекта..... 10

Шебе Х., Шубинский И.Б., Розенберг Е.Н. Оценки пределов вероятности неправильной классификации на примере прогнозирования опасных отказов..... 18

Полевский И.С. Применение преобразования Хафа для определения границы путей в задачах компьютерного зрения аппаратно-программного комплекса фиксации исполненного движения..... 24

Системный анализ в задачах надёжности и безопасности

Рыков В.В., Иванова Н.М. О функции надёжности системы $\langle G|_{k \leq n}|G|/ \rangle$. Часть I. Аналитические результаты 34

Защита информации

Нианг П.М., Сидоренко В.Г. Выбор алгоритма машинного обучения для обнаружения вторжений в IoT..... 44

Организация производства на транспорте

Юркевич Е.В., Крюкова Л.Н. Проблемы нормативного обеспечения функциональной надёжности цифрового производства..... 52

Кузьмина А.В., Попов В.Д. Влияние низкоинтенсивного облучения на быстродействие КМОП микросхем..... 61

Гнеденко – Форум 67

Увеличение пропускных и провозных способностей Восточного полигона с помощью использования передовых систем интервального регулирования движения поездов

Increasing the theoretical and practical capacity of the Eastern Operating Domain by means of advanced train separation systems

Дежков М.А.^{1*}, Тарасов К.А.², Чернин М.А.¹
Dezhkov M.A.^{1*}, Tarasov K.A.², Chernin M.A.¹

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

² Центральная дирекция управления движением – филиал ОАО «РЖД», Российская Федерация, Москва

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

² Central Traffic Management Directorate, a branch of JSC RZD, Russian Federation, Moscow

*m.dejkov@vniias.ru



Дежков М.А.



Тарасов К.А.



Чернин М.А.

Резюме. Цель. В настоящее время сеть магистральных железных дорог не в полной мере обеспечивает потребностей рынка в пропускной и провозной способности, из-за чего ОАО «РЖД» вынуждено ежедневно отклонять 2-4% заявок на перевозку грузов, маршрут которых проходит по ограничивающим объектам железнодорожной инфраструктуры. Процесс увеличения пропускной и провозной способности железнодорожных направлений путем строительства дополнительных путей на станциях и перегонах неприемлемо длительный и требует колоссальных капитальных вложений. **Методы.** Предлагается решение данной проблемы за счет увеличения интенсивности использования железнодорожной инфраструктуры путем сокращения межпоездных и станционных интервалов в графике движения при внедрении технологий интервального регулирования движения поездов с подвижными блок-участками и технологией «виртуальная сцепка». Данный подход позволяет сократить капитальные вложения до 32 раз, сроки реализации проектов – до 8 раз при сопоставимых значениях увеличения пропускной и провозной способности. В статье подробно показаны функциональность средств интервального регулирования и их технические параметры. **Выводы.** Технология интервального регулирования движения поездов внедрена и используется на Дальневосточной, Забайкальской, Восточно-Сибирской и Красноярской железных дорогах – филиалах ОАО «РЖД», входящих в состав Восточного полигона сети железных дорог ОАО «РЖД». Общая протяженность участков внедрения технологии интервального регулирования составила к концу 2023 г. 5734 км. **Заключение.** В 2023 году по участкам Восточного полигона проведено почти 36 тысяч пар поездов с сокращенным межпоездным интервалом. Средства интервального регулирования движения поездов также позволяют повысить безопасность и уровень цифровизации перевозочного процесса.

Abstract. Aim. Currently, the mainline railway network does not fully meet the market's needs in terms of capacity, which is why every day JSC RZD is forced to reject 2 to 4% of applications for the transportation of goods across routes passing through limited-capacity railway infrastructure facilities. Increasing the practical capacity of railway lines by building additional tracks at stations and on open lines is unacceptably long and requires massive capital investments. **Methods.** It is proposed to solve the above problem by increasing the utilization of railway infrastructure by reducing the succession times and station operation times in the traffic schedule by deploying moving block and virtual coupling. This approach allows reducing capital investments up to 32 times and the duration of project implementation up to 8 times with a comparable capacity increase. The paper details the functionality of train separation technology and its technical parameters. **Conclusion.** The train separation technology has been deployed and is in operation on the Far Eastern, Trans-Baikal, East Siberian, and Krasnoyarsk Railways, branches of JSC RZD, that are part of the Eastern Operating Domain of JSC RZD network. By the end of 2023, the total length of track covered by the train separation solution was 5,734 km. **Conclusion.** In 2023, the lines of the Eastern Operating Domain handled almost 36 thousand pairs of trains with reduced spacing. The train separation technology also allows improving the safety and the level of digitalisation of the transportation process.

Ключевые слова: интервальное регулирование движения поездов, технология «виртуальной сцепки», безопасность движения, автоведение, локомотивные устройства безопасности; имитационное моделирование, пропускная способность железнодорожных участков.

Keywords: train separation, virtual coupling, traffic safety, automatic train operation, onboard train protection devices, simulation, rail line capacity

Для цитирования: Дежков М.А., Тарасов К.А., Чернин М.А. Увеличение пропускных и провозных способностей Восточного полигона с помощью использования передовых систем интервального регулирования движения поездов // Надежность. 2024. №3. С. 3-9. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-3-3-9>

For citation: Dezhkov M.A., Tarasov K.A., Chernin M.A. Increasing the theoretical and practical capacity of the Eastern Operating Domain by means of advanced train separation systems. Dependability 2024;3:3-9. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-3-3-9>

Поступила: 29.02.2024 / **После доработки:** 16.05.2024 / **К печати:** 09.09.2024

Received on: 29.02.2024 / **Revised on:** 16.05.2024 / **For printing:** 09.09.2024

Введение

Переориентация рынков сбыта в Азиатско-Тихоокеанском направлении значительно увеличила нагрузку на железнодорожную магистраль Восточного полигона сети железных дорог. Сегодня ОАО «РЖД» реализует комплекс технических и технологических мероприятий по обновлению и модернизации железнодорожной инфраструктуры этого полигона, направленных на выполнение целевых показателей по пропуску заданных объемов перевозок на перспективу, установленных Правительством Российской Федерации.

Согласно данным Центральной дирекции управления движением – филиала ОАО «РЖД», около 25% грузооборота проходит по направлениям, имеющим дефицит пропускных способностей. На таких направлениях наблюдается замедление пропуска вагонопотоков из-за высокого значения коэффициента использования пропускной способности (более 0,9), что приводит к ухудшению эксплуатационных и экономических показателей работы магистрального железнодорожного транспорта, усложняет процесс содержания верхнего строения пути. Также ОАО «РЖД» вынуждено отклонять от 2 до 4% заявок на перевозку грузов через данные направления.

Для увеличения пропускной и провозной способности железнодорожных направлений ОАО «РЖД» реализует комплекс мероприятий по строительству дополнительных путей на станциях и перегонах, а также увеличения интенсивности использования существующей железнодорожной инфраструктуры с помощью средств интервального регулирования движения поездов. При этом внедрение средств интервального регулирования позволяет сократить капитальные вложения до 32 раз, сроки реализации проектов до 8 раз при сопоставимых значениях увеличения пропускной и провозной способности.

Средства интервального регулирования движения поездов делятся на два основных направления:

1) использование микропроцессорной автоблокировки с тональными рельсовыми цепями и централи-

зованным размещением аппаратуры с подвижными блок-участками (АБТЦ-М (Ш));

2) технология «виртуальная сцепка» (ВСЦ).

В условиях Восточного полигона сети железных дорог ОАО «РЖД» широко используется ВСЦ – соединение локомотивов последовательно следующих поездов по радиоканалу. При этом ведение второго («ведомого») поезда осуществляется с учетом информации, непрерывно получаемой с первого («ведущего») поезда по цифровому радиоканалу.

За счет использования средств интервального регулирования удалось сократить межпоездной интервал для грузовых поездов с 12-15 минут до 8-10 минут. Технология интервального регулирования движения поездов внедрена и используется на Дальневосточной, Забайкальской, Восточно-Сибирской и Красноярской железных дорогах – филиалах ОАО «РЖД», входящих в состав Восточного полигона сети железных дорог ОАО «РЖД».

1. Особенности разработки систем интервального регулирования движения поездов

Одним из эффективных решений по созданию условий проведения намеченных широкомасштабных работ по развитию инфраструктуры и приведению состояния путевой инфраструктуры к нормативным требованиям, охватывающих основные технологические процессы перевозок и создающих дополнительные возможности их наращивания, является внедрение технологий интервального регулирования с подвижными блок-участками и ВСЦ. При этом масштабная работа по модернизации железнодорожных систем автоматики и телемеханики, связанная с внедрением систем интервального регулирования с подвижными блок-участками, требует значительных материальных средств и времени для проектирования и проведения строительно-монтажных работ. Поэтому приоритет в реализации указанных технологий был отдан технологии ВСЦ, реализуемой бортовыми устройствами магистральных локомотивов.

Для решения важнейших научно-технических задач по повышению пропускных способностей, наряду с научно-конструкторскими подразделениями АО «НИИАС», к работе по реализации технологии интервального регулирования движения поездов ВСЦ привлечены следующие подразделения:

– ООО «НПО САУТ» для создания инновационной продукции в области развития систем управления подвижным составом и систем обеспечения безопасности движения поездов;

– ООО «АВП Технология» для разработки инновационных систем управления и регистрации подвижного состава, беспроводной передачи данных о работе и техническом состоянии подвижного состава и создания современных информационно-управляющих технологий;

– ООО «Апогей» и ООО «Пульсар-Телеком» для создания бортовых радиотехнических комплексов, обеспечивающих передачу информации между локомотивами.

Для реализации технологии ВСЦ в качестве модернизируемого подвижного состава выбран наиболее массовый электровоз, задействованный в грузовом движении на Восточном полигоне, – ЗЭС5К «Ермак».

Были разработаны и поставлены на производство: отечественные бортовые интеллектуальные системы автоматизированного вождения поездов повышенной массы и длины с распределенной тягой с новыми принципами и алгоритмами управления локомотивами (ИСАВП-РТ-М); устройства безопасности движения поездов (модернизированные КЛУБ-У, БЛОК) с новым программным обеспечением и обновленными базами электронных карт; новые радиомодемы (М-ЛИНК), обеспечивающие надежную связь между локомотивами на расстояниях до 10-12 км.

Управление ведущим и ведомым локомотивами может осуществляться как в режиме автоведения (система ИСАВП-РТ-М), так и в ручном режиме машинистом (режим «Советчик»). Для расчета режима ведения ведомого поезда используется информация о координате, режиме ведения (разгон, выбег, торможение), скорости и показаниях локомотивного светофора ведущего поезда, а также данные собственной электронной карты, графика движения и других показаний. Необходимо отметить, что местоположение поездов определяется на основе спутниковых данных и электронной карты с точностью до нескольких десятков метров, что обеспечивает безопасность выполнения режимов ведения.

Повышенная дальность связи между двумя локомотивами в диапазоне 160 МГц обеспечивается за счет приема и передачи пакетов данных с использованием помехозащищенных турбокодов с применением векторного вида модуляции CQPSK. При необходимости дальнейшее наращивание возможностей радиомодема осуществляется заменой программного обеспечения. При этом особое внимание разработчиками уделено парированию высокоэнергетических импульсных помех, которые преобладают в системах железнодорожной радиосвязи. В сочетании с использованием перемежающихся турбо-кодов Ридда-

Майлера, которые позволяют восстановить до 13% выбитой в кодограмме информации, обеспечена как большая чувствительность приемника, так и, соответственно, большая дальность связи. При этом обеспечивается:

– вероятность неприема пакета данных при уровне входного сигнала 1 мкВ – не более 10^{-6} ;

– вероятность неприема пакета данных при работе в протоколе CQPSK при уровне входного сигнала 0,2 мкВ – не более 10^{-6} ;

– вероятность трансформации кодовой посылки – не более 10^{-13} .

Бортовые системы управления локомотивом, безопасности, связи и автоведения, обеспечивающие реализацию технологии, разработаны с использованием отечественного кросс-платформенного программного обеспечения, что позволяет для их внедрения использовать импортонезависимые операционные системы и системы управления базами данных. В вычислителях применяются алгоритмы управления, процессоры функционируют с рабочей тактовой частотой 800 МГц, с объемом памяти 32 Гбайт (при необходимости легко расширяемые до 128 Гбайт).

2. Функциональные возможности

Функциональные возможности ИСАВП-РТ-М позволили обеспечить:

– совместимость и невмешательство в работу системы автоведения при осуществлении ведения локомотива в режиме одиночного поезда;

– автоматическую передачу управления системе автоведения при длительном отсутствии обмена данными по радиоканалу между локомотивами, идущими друг за другом в попутном следовании, для обеспечения безопасного ведения локомотива в режиме одиночного поезда по сигналам АЛСН;

– работу в режиме ведения поездов по технологии ВСЦ в режимах ведущий и ведомый на безопасном расстоянии между поездами;

– непрерывную оценку эффективности работы тормозной системы ведущего и ведомого поездов;

– ведение базы данных на борту локомотива зон распространения радиосигнала при работе в режиме ВСЦ для безопасного переключения режимов работы между унифицированной системой автоматизированного ведения поездов (УСАВП) и ИСАВП-РТ-М в зонах отсутствия устойчивой радиосвязи;

– автоматизированное управление тягой и электродинамическим тормозом локомотива путем передачи в микропроцессорную систему управления и диагностики оборудования электровозов (МСУД-Н) команд управления, а также управление пневматическими тормозами состава поезда;

– автоматизированное управление пневматическим и электродинамическим тормозами локомотива и поезда при подъезде к местам ограничения скорости и светофорам, ограничивающим скорость движения, остановку у светофора с запрещающим показанием служебным тор-

можением в соответствии с «Правилами технического обслуживания тормозного оборудования и управления тормозами железнодорожного подвижного состава»;

- ведение поезда по главным путям станции со скоростями, заданными системой автоматического управления торможением поездов (САУТ-ЦМ) (при наличии напольных устройств);

- ведение поезда со скоростями, не превышающими разрешенные устройствами безопасности и действующими нормативными документами;

- два режима работы: «Советчик» и «Автоведение». В режиме «Советчик» управление локомотивом осуществляется машинистом, а система выдает на блок индикации рекомендуемые (расчетные) значения параметров движения, не воздействуя на цепи управления локомотива. В режиме «Автоведение» управление локомотивом осуществляется системой. Переход из одного режима в другой должен осуществляться по команде машиниста;

- автоматический переход в режим «Советчик» с выдачей речевого сообщения в случае обнаружения сбоев или отказов в системе;

- прибытие поезда на кодированные боковые пути станций в режиме «Автоведение» (при наличии напольных устройств САУТ-ЦМ);

- переход в режим «виртуальная сцепка» на стоянке и в движении автоматически (при восстановлении связи) или по команде машиниста;

- адаптацию управления к текущему сопротивлению движения, напряжению в контактной сети, тяговым и тормозным характеристикам локомотива и поезда;

- автоматический выход из режима тяги при подъезде к нейтральной вставке в режиме «Автоведение» не менее чем за 100 м;

- автоматический (по данным с сервера системы взаимодействия с локомотивом по технической радиосвязи (СВЛ ТР) и ручной (машинистом) ввод и корректировку необходимой для автоведения информации:

- табельный номер машиниста;
- количество вагонов в составе поезда и его массу;
- места (координаты начала и конца) и величины временных ограничений скорости с учетом нарушения линейного изменения километража и пикетов нестандартной длины (не равных 100 м);

- выдачу на блок индикации микропроцессорной системы управления и диагностики электрооборудования электровоза (БИ МСУД) графической и текстовой информации согласно документу «Основные требования к экрану графического интерфейса системы информирования машиниста», утвержденному ОАО «РЖД»;

- автоматический перезапуск системы в случае программного сбоя с восстановлением работоспособности в течение 20 сек. с сохранением введенной ранее информации, необходимой для автоведения;

- вычисление и вывод на БИ МСУД текущей железнодорожной координаты с учетом нарушения линейного изменения километража и пикетов нестандартной длины (не равных 100 м);

- автоматическую и ручную (с клавиатуры) коррекцию текущей железнодорожной координаты;

- прием от системы САУТ-ЦМ данных по маршруту приема на станцию;

- прием от системы КЛУБ-У данных по маршруту приема на станцию, получаемых по каналу автоматической локомотивной сигнализации АЛС-ЕН (при их наличии), и их отработку в режиме автоведения;

- прием от системы КЛУБ-У значений фактической, целевой и допустимой скоростей;

- прием от системы КЛУБ-У вида цели, расстояния до цели, астрономического времени и даты, номера пути;

- обмен данными, необходимыми для ведения «виртуальной сцепки» между ведущим и ведомым локомотивом по цифровому радиоканалу диапазона МВ (150-160 МГц), и/или LTE (при наличии устойчивого покрытия сигналом базовых станций на участках движения поездов);

- передачу данных между локомотивами со следующей периодичностью:

- 1 раз в 1 секунду при работе на основном канале;
- не реже чем 1 раз в 2 секунды при работе на резервном канале;

- передачу команд с задержкой не более 1 сек.

Надежность бортовых систем безопасности, автоведения и связи для реализации технологии ВСЦ доказана в период проведения подконтрольной эксплуатации и прошла все необходимые стадии постановки продукции на производство в соответствии с ГОСТ 15.902-2014 «Система разработки и постановки продукции на производство. Железнодорожный подвижной состав. Порядок разработки и постановки на производство».

Безопасность ведения поезда системой ИСАВП-РТ-М обеспечивается установленными на локомотиве устройствами безопасности (КЛУБ-У, САУТ-ЦМ/485). Качество и наличие/отсутствие радиосвязи между поездами, идущими друг за другом в попутном следовании, не влияло на безопасность движения.

При отказах технических средств системы на виртуально соединенном поезде, в том числе программных средств, бортовые системы переходили в режим ведения одиночного поезда, не превышая разрешенные устройствами безопасности и нормативными документами скорости, что предусмотрено инструкцией по эксплуатации системы.

При пропадании канала радиосвязи режим ВСЦ ведомого поезда отключается и движение продолжается в штатном режиме по показаниям автоматической локомотивной сигнализации.

Результаты работы бортовых систем безопасности и автоведения, проанализированные через системы «КОВ-ЧЕГ» и автоматизированную систему учета и анализа нарушений безопасности движения поездов по результатам автоматической расшифровки кассет регистрации локомотивных устройств (АСУТ НБД-2), позволяют сделать вывод об устойчивости работы бортовых систем и обеспечении требуемого уровня надежности.

ОАО «РЖД», входящих в состав Восточного полигона сети железных дорог ОАО «РЖД». Общая протяженность участков внедрения технологии ВСЦ на Восточном полигоне в период с 2019 по 2024 г. составила к концу 2023 г. 5734 км (участок Мариинск–Тайшет–Находка–Восточная).

В 2023 году по участкам Восточного полигона в данном режиме проведено почти 36 тысяч пар поездов (71 726 поездов) с увеличением их количества по сравнению с 2022 годом в 2,9 раз (2022 год – 12 226 поездов) (рис. 3).

Решениями протокола заседания Научно-технического совета ОАО «РЖД» были определены основные направления развития технологии – это организация пакетного пропуска ВСЦ, движения по неправильному пути в режиме ВСЦ, прибытия и отправления на станции поездов в режиме автоведения. При выполнении этих задач на Восточном полигоне были организованы испытания, подтвердившие техническую возможность реализации всех заявленных функций.

На станции Красноярск-Восточный Красноярской железной дороги проведены испытания функции передачи на локомотив данных о маршруте приема и прибытия на станцию в автоматизированном режиме, в рамках которых подтверждена возможность реализации передачи по радиоканалу информации от станционной аппаратуры о маршруте приема поезда, для обеспечения прибытия поезда на станцию в режиме автоведения, в том числе на боковые пути.

На участках Красноярск-Восточный – Мариинск Красноярской железной дороги и Хабаровск II – Ружино Дальневосточной железной дороги проведены опытные поездки и подтверждена возможность реализации автоматического соединения поездов в пакет на перегоне с применением контроллеров логики радиоканальных КЛР.1 и радиомодемов передачи данных М-ЛИНК.

16 ноября 2023 года впервые в России на участке Хабаровск II – Ружино протяженностью 396 км с межпоездным интервалом 8 минут проследовал виртуальный сцеп из 5 составов общей массой 26 663 тонны. Полученные результаты подтвердили адаптивность системы интервального регулирования при формировании пакетов из поездов различной массы и длины, а также возможность устойчиво выдерживать интервал движения поездов в фактических условиях энергоснабжения.

При проведении испытаний на полигоне Забайкальской железной дороги подтверждена возможность движения поездов в режиме «Автоведение» при следовании по неправильному пути.

Достигнутое в результате внедрения ВСЦ сокращение межпоездного интервала позволяет повысить эксплуатационную надежность графика движения поездов, возможность его восстановления после сбойных ситуаций, что обеспечивает повышение стабильности перевозочного процесса.

4. Перспективы развития

Несмотря на значительное развитие технологии ВСЦ, на сегодняшний день по-прежнему имеются резервы, реализация которых может значительно повысить ее эффективность. Остановливаясь на перспективах развития проекта стоит отметить:

- разработку методологии управления поездопотоками с применением технологии ВСЦ с учетом возможностей действующей инфраструктуры тягового электроснабжения;
- совершенствование технологий работы технических станций формирования приема и обработки пакетов, а также безостановочного пропуска ВСЦ поездов по диспетчерским участкам;
- выполнение имитационного моделирования для разработки вариантных графиков с применением технологии ВСЦ для повышения пропускной способности участков при организации ремонтных и строительных работ с закрытием перегонов;
- актуализацию бортовой базы автоведения на участках, где при проведении ремонтных работ проведена укладка блок-постов, временных диспетчерских съездов, перенос нейтральных вставок и др.;
- автоматизацию процессов учета выполняемой работы по технологии ВСЦ в рамках разрабатываемой технологии графика исполненного движения нового поколения (ГИД НП);
- разработку технологии автоматической передачи предупреждений на грузовые локомотивы с системой автоведения;
- автоматическое соединение поездов как на станциях, так и на перегонах, за счет реализации функций взаимного обмена данными по радиоканалу между локомотивами;
- разработку технологии интеграционного взаимодействия между ГИД и устройствами безопасности по передаче данных о фактическом маршруте следования и маршрутах в электронной карте;
- доработку мотивационной составляющей для эксплуатационных служб с целью повышения удельной протяженности поездок в режиме ВСЦ.

Заключение

Технология интервального регулирования движения поездов позволяет решить проблему дефицита провозной способности железнодорожных направлений в сжатые сроки с относительно невысокими капитальными вложениями. Ведется интенсивная работа по внедрению средств интервального регулирования движения поездов, а также по повышению эффективности ее применения.

Библиографический список:

1. Андреев В.Е., Пронкин А.В., Долгий А.И. и др. Развитие технологий интервального регулирования движения поездов: итоги и перспективы // Транспорт Российской Федерации. 2023. № 1-2. С. 6-12.

2. Долгий А.И. Концептуальный подход к построению современной платформы управления перевозочным процессом в ОАО «РЖД» // Труды АО «НИИАС»: Сборник статей. М.: Типография АО «Т 8 Издательские Технологии». 2021. Т. 1. Вып. 11. С. 9-31.

3. Кобзев С.А., Розенберг Е.Н., Воронин В.А. и др. Комплексная технология интервального регулирования движения поездов // М.: АО «Т 8 Издательские технологии», 2023. С. 216.

4. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации. 3-е изд., испр. и доп. М.: ИНФРА-М, 2022. 622 с.

References

1. Andreev V.E., Pronkin A.V., Dolgiy A.I., Rosenberg E.N. Development of integrated train traffic control technologies: results and prospects. *Transport of the Russian Federation* 2023;1-2:6-12. (in Russ.)

2. Dolgiy A.I. [Conceptual approach to the construction of JSC RZD's advanced traffic management platform]. In: [Transactions of JSC NIIAS: collected articles]. Moscow: T8 Izdatelskiye Tekhnologii; 2021. Vol. 1. Issue 11. Pp. 9-31. (in Russ.)

3. Kobzev S.A., Rozenberg E.N., Voronin V.A. et al. [Comprehensive train separation process]. Moscow: T8 Izdatelskiye Tekhnologii; 2023. P. 216. (in Russ.)

4. [Rules of operation and maintenance of railways of the Russian Federation. 3rd ed., revised and extended]. Moscow: INFRA-M; 2022. (in Russ.)

Сведения об авторах

Дежков Михаил Александрович – заместитель начальника департамента научных исследований, аналитики и совершенствования научно-технической деятельности, Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), Нижегородская улица, дом 27, строение 1, г. Москва, Российская Федерация, 109029. Почетное звание АЭН РФ «Доктор электротехники», член-корреспондент АЭН РФ. e-mail: m.dejkov@vniias.ru

Тарасов Кирилл Александрович – Главный инженер Центральной дирекции управления движением – филиала ОАО «РЖД» (ЦД). Каланчевская улица, дом 35, г. Москва, Российская Федерация, 129090. e-mail: tarasovka@center.rzd

Чернин Марк Абрамович – Начальник центра научно-технологических экспертиз, Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»),

Нижегородская улица, дом 27, строение 1, г. Москва, Российская Федерация, 109029. Ученое звание: нет. Почетное звание: знак «Почетному железнодорожнику» (2003 г), звание «Новатор ОАО «РЖД» (2015 г), знак «За безупречный труд на железнодорожном транспорте 40 лет», Лауреат премии им. Черепановых. e-mail: m.chernin@vniias.ru

About the authors

Mikhail A. Dezhkov, Deputy Head of the Department for Scientific Research, Analytics, and Improvement of Research and Engineering Activities, Joint Stock Company Research and Design Institute for Information Technology, Signalling, and Telecommunications in Railway Transportation (JSC NIIAS), 27, bldg 1 Nizhegorodskaya St., Moscow, 109029, Russian Federation. Honorary Doctor of Electrical Engineering of the Academy of Electrical Engineering of the Russian Federation. E-mail: m.dejkov@vniias.ru

Kirill A. Tarasov, Chief Engineer, Central Traffic Management Directorate, a branch of JSC RZD. 35 Kalanchiovskaya St., Moscow, 129090, Russian Federation, e-mail: tarasovka@center.rzd.

Mark A. Chernin, Head of the Centre for Scientific and Technical Evaluation, Joint Stock Company Research and Design Institute for Information Technology, Signalling, and Telecommunications in Railway Transportation (JSC NIIAS), 27, bldg 1 Nizhegorodskaya St., Moscow, 109029, Russian Federation. Scientific degree: none. Honorary degrees: Honorary Railwayman badge (2003), Innovator of JSC RZD (2015), badge For Impeccable Performance in Railway Transportation 40 Years, Cherepanov Prize m.chernin@vniias.ru

Вклад авторов в статью

Чернин М.А. – формирование структуры статьи, целей и задач научного исследования по применению технологии интервального регулирования движения поездов «виртуальная сцепка».

Дежков М.А. – исследование функциональных возможностей и надежности бортовых систем автоведения и цифровой связи для реализации технологии «виртуальная сцепка»

Тарасов К.А. – исследование влияния применения новых бортовых технических средств по объединению попутно следующих грузовых поездов в единый пакет для повышения пропускных способностей Восточного полигона

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Начала законодательства для автономных систем искусственного интеллекта

Fundamentals of legislation for autonomous artificial intelligence systems

Романова А.С.
Romanova A.S.

кандидат экономических наук, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), аспирант, г. Москва, Российская Федерация
PhD, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), postgraduate student, Moscow, Russian Federation
romanova.as@phystech.edu
ORCID 0009-0004-4649-6037



Романова А.С.

Резюме. В статье предлагается метод формирования выделенного операционного контекста при разработке и внедрении автономных систем управления корпорациями на примере автономных систем для совета директоров. Значительную часть операционного контекста для автономных систем управления компаниями составляет регуляторная и правовая среда, в рамках которой корпорации осуществляют свою деятельность. С целью создания специального операционного контекста для автономных систем искусственного интеллекта формулировки локальных нормативных документов могут быть одновременно представлены в двух вариантах: для использования людьми и для использования автономными системами. В таком случае система искусственного интеллекта получает четко очерченный операционный контекст, который позволяет такой системе выполнять функции в рамках необходимых эксплуатационных качеств. Локальные нормативные акты, которые предусматривают специфику совместной работы физических лиц и автономных систем искусственного интеллекта, могут стать базой для формирования основ соответствующего законодательства, регулирующего разработку и внедрение автономных систем.

Abstract. The paper proposes a method for defining a dedicated operational context as part of the development and deployment of autonomous corporate governance systems. The case study of autonomous board of directors systems is examined. A significant part of the operational context for the autonomous corporate governance systems consists of the regulatory and legal framework that regulates the company's operations. A special operational context for autonomous artificial intelligence systems can be defined by simultaneously formulating local regulatory documents in two versions, i.e., to be used by people and by autonomous systems. In such a case, the artificial intelligence system receives a clearly defined operational context that allows such a system to perform its functions with a required operational quality. Local regulations that take into account the specificity of operations involving individuals and autonomous artificial intelligence systems can become the foundation of the relevant legislation that would regulate the development and deployment of autonomous systems.

Ключевые слова: автономные системы, искусственный интеллект, операционный контекст, совет директоров, корпоративное управление

Keywords: autonomous systems, artificial intelligence, operational context, board of directors, corporate governance

Для цитирования: Романова А.С. Начала законодательства для автономных систем искусственного интеллекта // Надежность. 2024. №3. С. 10-17. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-3-10-17>

For citation: Romanova A.S. Fundamentals of legislation in autonomous artificial intelligence systems. Dependability 2024;3:10-17. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-3-10-17>

Поступила: 29.02.2024 / **После доработки:** 15.05.2024 / **К печати:** 09.09.2024

Received on: 29.02.2024 / **Revised on:** 15.05.2024 / **For printing:** 09.09.2024

Введение

Системы искусственного интеллекта (далее ИИ), разрабатываемые для участия в управлении корпорациями, должны эффективно работать не только с объектами материального мира, но и в правовом поле. “По крайней мере начиная с Лейбница, мечта об исключении человека из спирали юридических рассуждений захватила воображение философов, юристов и (в последнее время) ученых-компьютерщиков” [1]. Идея Лейбница представлена “в его *Dissertatio de Arte Combinatoria* как Универсальная Математика, теоретическая, формальная система предложений и правил, которая позволила бы разрешить все споры с математической точностью” [1]. Исторически законы создавались и исполнялись людьми. С развитием технологий искусственного интеллекта законы будут исполняться машинами. Уровень точности формулировок, приемлемый для современного человека, намного ниже, чем уровень точности, необходимый для искусственной системы. Существует фундаментальная разница “между человеческими решениями, как социальными конструкциями, и алгоритмическими решениями, как техническими конструкциями” [2]. Математик Стивен Вольфрам в своем выступлении на конференции SXSW 2013 сказал: “вычисления станут центральным элементом почти в каждой области” [3]. Вольфрам считает, что: “теперь мы почти готовы... к вычислительному закону. Где, например, контракты становятся вычислительными. Они явным образом становятся алгоритмами, которые решают, что возможно, а что нет” [3]. Вольфрам предполагает, что для систем искусственного интеллекта необходимо будет принять отдельную конституцию [4]. Однако вопрос: “Что должно быть в такой конституции?” [4] на данный момент остается открытым.

Современные автономные системы ИИ для управления корпорациями уже позиционируются как активное действующее лицо, способное принимать решения на уровне совета директоров, оценивать стратегические опции, предоставлять рекомендации акционерам [5]. Тем не менее, на данный момент, ни в одной стране мира не принято, и даже не разработано законодательство, регулирующее создание и применение таких систем.

Законодатели, разработчики, корпорации, а также их акционеры заинтересованы в том, чтобы автономные системы ИИ могли эффективно применяться в корпоративном управлении, не создавая при этом необоснованных и неуправляемых рисков. Формирование соответствующего законодательства, учитывающего не только теоретические правовые концепции, но технические особенности современных автономных систем ИИ, является жизненно важным и необходимым условием, которое позволит разрабатывать и внедрять законные, этичные, и безопасные автономные системы ИИ в управлении корпорациями.

Рабочее пространство разработки и операционный контекст

Наиболее эффективные подходы к разработке и применению гражданских и коммерческих автономных систем в настоящее время выработаны в области создания и использования автономных автомобилей. При создании автономных транспортных средств используется понятие “домен операционного проектирования (ODD)” [6], который “является абстракцией операционного контекста, а его определение является интегральной частью процесса разработки системы” [6]. Международный стандарт J3016 “Таксономия и определения терминов, связанных с системами автоматизации вождения для дорожных транспортных средств” Общества автомобильных инженеров (SAE) определяет домен операционного проектирования как “комбинированные условия эксплуатации, при которых данная система автоматизации вождения (или ее функция) специально разработана для функционирования” [7]. “Необходимо знать операционный контекст, чтобы предоставлять гарантии по эксплуатационным качествам и безопасности” [6]. Соответственно, “необходимый уровень безопасности гарантируется только в четко определенном и испытанном домене операционного проектирования” [6]. Британский институт стандартов (BSI) указывает, что “ключевым аспектом безопасного использования автоматизированного транспортного средства является определение его возможностей и ограничений и ясная коммуникация об этом конечному пользователю, что приводит к состоянию «информированной безопасности»” [8]. Британский институт стандартов считает, что “первым шагом при установлении возможностей автоматизированных транспортных средств является определение области операционного проектирования (ODD)” [8].

Для автономных систем корпоративного управления частью операционного контекста являются законы и другие нормативно-правовые документы, а также толкование и применение законов и документов другими системами ИИ и людьми. Стивен Вольфрам – не единственный, кто пришел к выводу о том, что для эффективной работы автономных систем ИИ необходимо внести существенные изменения в законодательную систему. В отчете Европейской Комиссии по “Этике подключенных и автоматизированных транспортных средств” говорится, что автономные автомобили не смогут буквально соблюдать правила, созданные для людей. Для успешного внедрения беспилотных автомобилей необходимо рассматривать несколько опций: “(a) должны быть изменены правила дорожного движения; (b) автономным автомобилям должно быть разрешено не соблюдать правила дорожного движения; или (c) автономные автомобили должны передавать управление, чтобы человек мог принять решение не соблюдать правила дорожного движения” [9].

Современная юридическая практика уже знает меры, когда для систем со значительной разницей в

мировосприятии создается дополнительный или специальный операционный контекст – это двуязычные контракты. Например, “китайское законодательство требует, чтобы договор о совместном предприятии одобрялся китайскими государственными органами” [10]. Поэтому закономерно, что “договор о совместном предприятии должен быть написан на китайском языке” [10]. В тех же случаях, когда нужен двойной операционный контекст, “договор о совместном предприятии является двуязычным договором: есть один договор, но с двумя разными текстами, один на английском и один на китайском” [10].

Рассматривая ситуации, когда автономная система ИИ должна будет принимать неочевидные для человека решения, многие исследователи по-прежнему формулируют возможные критерии для принятия решения исходя из привычных категорий восприятия человека другим человеком: “раса, религия, пол, инвалидность, возраст, национальность, сексуальная ориентация, гендерная идентичность или гендерное самовыражение” [11]. В знаменитом эксперименте Машина Морали (Moral Machine) исследователи из Массачусетского технологического института (MIT) также использовали только очевидные для человека факторы: пол, возраст, и т.д. [12]. Для систем ИИ, созданных на основе математических алгоритмов и получающих цифровую информацию с помощью разнообразных датчиков, такие критерии являются лишь небольшой частью данных, на основании которых система ИИ рассчитывает решение.

В современном мире уже существуют системы ИИ, которые в автономном режиме решают специфические задачи, напрямую не принимая управленческие решения. Это системы, которые принимают очень быстрые финансовые решения – системы алгоритмического и высокочастотного трейдинга [14]. Для таких систем разработаны специальные регуляторные техники: “раскрытие информации, внутреннее тестирование и системы мониторинга” [14]. Также для таких систем предусмотрены “структурные особенности торгового процесса” [14], т.е. для таких систем создан специальный операционный контекст.

Формирование операционного контекста для автономных систем управления

По аналогии со стандартом J3016 “Таксономия и определения терминов, связанных с системами автоматизации вождения для дорожных транспортных средств” для автономных систем управления корпорациями также можно сформулировать понятие домена операционного проектирования: это комбинированные условия эксплуатации, при которых данная система автоматизации управления (или ее функция) специально разработана для функционирования. Значительную часть операционного контекста для автономных транспортных средств составляют объекты материального мира, однако для автономных систем управления компаниями “регуля-

торная и правовая среда, в рамках которой корпорации осуществляют свою деятельность, имеет ключевое значение для общих экономических результатов” [14]. Существенную часть операционного контекста для автономных систем управления корпорациями составляют разнообразные нормативные акты. Принципы корпоративного управления G20/ОЭСР устанавливают, что “цели корпоративного управления также формулируются в добровольных кодексах и стандартах, которые не имеют статуса закона или нормативных актов” [14]. С целью создания специального операционного контекста для автономных систем ИИ формулировки локальных нормативных документов могут быть одновременно представлены в двух вариантах: для использования людьми и для использования автономными системами. В таком случае система ИИ получает четко очерченный операционный контекст, который позволяет такой системе выполнять функции в рамках необходимых эксплуатационных качеств.

Основные принципы корпоративного управления, а также базовые функции совета директоров, изложены в “Принципах корпоративного управления G20/ОЭСР” [14]. С целью разъяснения и внедрения Принципов G20/ОЭСР многие страны и компании разрабатывают и применяют собственные, более детальные, кодексы корпоративного управления. Принципы G20/ОЭСР и кодексы корпоративного управления формируют основу, которая является базой для создания операционного контекста для автономных систем управления корпорациями. Рассмотрим несколько примеров формулирования политик для автономных систем ИИ в составе смешанных советов директоров (советов, состоящих из физических лиц и автономных систем ИИ).

Принцип справедливого отношения ко всем акционерам

Ключевым принципом корпоративного управления является “справедливое отношение ко всем акционерам” [14]. Понятие справедливого отношения для автономных систем в современной практике формализуется с помощью принципов информированного согласия [9], недискриминации [11], и справедливого статистического распределения рисков [9].

Информированное согласие

Современные исследователи систем ИИ приходят к выводу, что “инженеры не имеют морального права принимать этические решения от имени пользователей в трудных случаях, когда ставки высоки” [15]. В отчете по “Этике подключенных и автоматизированных транспортных средств” указывается, что для использования автономных систем необходимо разрабатывать “более тонкие и альтернативные подходы к пользовательским соглашениям” [9] для получения информированного согласия, а не просто подход “соглашайся или уходи” [9]. Информированное согласие предполагает информирование пользователя о том, как система ИИ будет себя

вести в обычных условиях и в критических ситуациях. Аварийные ситуации на дороге, в которых участвовали автопилоты Tesla (Tesla), показывают, что “неясно, были ли бета-тестеры Tesla полностью проинформированы о риске. Знали ли они, что смерть возможна?” [16]. Корпоративные политики, регламенты, и кодексы, в которых описаны основы и правила работы автономной системы ИИ, позволят акционерам и другим заинтересованным лицам выразить информированное согласие на использование такой системы в корпоративном управлении. Поскольку правила корпоративного управления должны исполняться одновременно и директорами – физическими лицами, и автономными системами, они могут быть составлены в двух редакциях – для физических лиц и для автономных систем ИИ:

- политики, регламенты, и кодексы для физических лиц должны регулировать вопросы корпоративного управления, основываясь на мировосприятии физических лиц;
- политики, регламенты, и кодексы для автономных систем ИИ должны регулировать вопросы корпоративного управления, основываясь на показателях, доступных для систем ИИ.

Недискриминация

В отчете по “Этике подключенных и автоматизированных транспортных средств” указывается, что необходимо избегать “дискриминационного предоставления услуг” [9] автономными системами. Систему ИИ можно и нужно тестировать на наличие предвзятости, прямой и косвенной дискриминации [17]. Корпоративная политика, составленная для смешанного совета директоров, должна предусматривать, какие тесты на непредвзятость должна пройти или регулярно проходить автономная система, чтобы соблюдать правила о непредвзятости, их регулярность, и перечень признаков прямой и косвенной дискриминации.

Справедливое статистическое распределение рисков

Принципы G20/ОЭСР устанавливают, что “совет директоров должен соблюдать высокие этические стандарты” [14]. В отчете по “Этике подключенных и автоматизированных транспортных средств” отмечается, что в критических ситуациях “невозможно регулировать точное поведение” [9] автономных систем. Поэтому группа экспертов ЕС предлагает считать поведение автономных систем этичным если “оно органически возникает из непрерывного статистического распределения риска... в целях повышения безопасности... и равенства между категориями участников” [9]. Для справедливого распределения риска современные исследователи пробуют использовать абстрактные величины: “пропорциональная зависимость между скоростями участников дорожного движения и тяжестью вреда может быть установлена независимо от какой-либо этической оценки” [18]. Такой подход не всегда возможен, особенно в случае распреде-

ления ограниченных ресурсов. Для аллокации дефицитных медицинских препаратов на практике выработаны несколько алгоритмов: “одинаковое отношение ко всем людям, предпочтение наименее худшим случаям, максимизация общих выгод, а также поощрение и вознаграждение социальной полезности” [19]. Поэтому политики, кодексы, регламенты, составленные для смешанного совета директоров, должны раскрывать для акционеров и третьих лиц, каким образом формируются требования к автономным системам в части этики и справедливости, а именно, критерии и показатели для формирования алгоритмов справедливого распределения рисков.

Мониторинг результатов управленческой деятельности

Принципы G20/ОЭСР определяют, что “совет директоров, прежде всего, отвечает за контроль результатов управленческой деятельности” [14]. В этом случае могут возникнуть ситуации, когда автономная система ИИ будет оценивать результаты деятельности менеджера – физического лица. В Кодексе корпоративного управления Португалии устанавливается, что “неисполнительные директора должны осуществлять эффективным и разумным образом функцию общего надзора и оспаривания исполнительного руководства” [20]. Более того, по аналогии с концепциями непрерывной отчетности и непрерывного аудита, автономная система ИИ способна осуществлять “непрерывный мониторинг” результатов управленческой деятельности. Концепция “непрерывного аудита” [21] была предложена еще в 1991 году в AT&T Bell Labs для “аудита больших цифровых баз данных” [21]. Система осуществляла “мониторинг и обеспечение в режиме реального времени большой биллинговой системы, фокусируясь на измеряемых данных и идентифицируя с помощью методов аналитики ошибки в данных, что приводит как к контролю, так и к диагностике процесса” [22]. Авторы концепции указывали, что ее внедрение “потребует существенных изменений в характере доказательств, типах процедур, сроках и распределений усилий в аудите” [21], т.е. изменения существующего операционного контекста или создания дополнительного. Концепция непрерывного аудита неразрывно связана с концепцией “непрерывной отчетности” [22]. При создании политик и процедур для автономных систем ИИ компания должна определить, получает ли она значительные конкурентные преимущества при отслеживании транзакций, событий, и информации в режиме реального времени. Политики, кодексы, и регламенты для автономных систем ИИ должны содержать конкретный перечень активностей, источников, и значений для мониторинга эффективности управленческой деятельности.

Соблюдение законодательства

Принципы G20/ОЭСР указывают, что в обязанности совета директоров входит “надзор за системой управления рисками и механизмами, предназначенными

для обеспечения того, чтобы корпорация соблюдала применимое законодательство” [13]. Современные системы мониторинга регуляторных рисков способны обеспечивать непрерывный мониторинг рисков во многих направлениях одновременно: “соблюдение нормативных требований по борьбе со взяточничеством и коррупцией, соответствие требованиям по борьбе с отмыванием денег, соблюдение нормативных требований в отношении финансовых услуг, оценка рисков текущих и потенциальных деловых партнеров, агентов и поставщиков, риски слияния и поглощения и инвестиций в развивающиеся и глобальные рынки, отраслевые и страновые риски” [23]. Для достижения такого широкого и детального анализа компании создают системы, которые “консолидируют данные из широкого круга мировых источников данных” [23]. Перечень источников данных, которые может собирать и анализировать автономная система может быть очень разнообразным: “ведущие агрегаторы данных, скрининг... в СМИ и/или судебные обзоры, информация о корпоративной структуре и операционной деятельности, владения третьих лиц и акционеры” [23]. Корпоративные политики, кодексы и регламенты, составленные для автономных систем ИИ в составе смешанного совета директоров, должны содержать конкретный перечень источников и расписание обновлений информации.

Соблюдение интересов третьих лиц

При раскрытии обязанностей советов директоров Принципы G20/ОЭСР определяют, что “ожидается, что они будут учитывать и справедливо относиться к интересам заинтересованных сторон, в том числе сотрудников, кредиторов, клиентов, поставщиков и затронутых сообществ” [14]. В отчете Европейской Комиссии по “Этике подключенных и автоматизированных транспортных средств” предлагается, что автономные системы должны “адаптировать свое поведение к менее защищенным участникам дорожного движения, вместо того чтобы ожидать, что эти пользователи будут сами адаптироваться” [9]. Также предлагается, что автономные системы “должны быть разработаны таким образом, чтобы принимать активные меры для продвижения инклюзивности” [9]. Исследователи из Мюнхенского технического университета предлагают включать в алгоритм справедливого распределения рисков специальные параметры для менее защищенных пользователей [18]. Корпоративные политики, кодексы и регламенты, составленные для автономных систем ИИ в составе смешанного совета директоров, должны содержать параметры и соответствующие веса, которые необходимо учитывать при рассмотрении интересов третьих лиц.

Информированность, добросовестность, осмотрительность, и заботливость

Принципы G20/ОЭСР устанавливают, что “члены совета должны действовать в условиях полной информированности, добросовестно, с должной осмотрительно-

стью и заботливостью, в наилучших интересах компании и акционеров.” [14]. Для систем ИИ информированность формализуется в перечне и объеме необходимых источников и данных, а также регулярности обновления источников, данных, алгоритмов и моделей. При значительном объеме транзакций для человека невозможно установить обязанность проверять каждую операцию и в любой момент времени. Система ИИ может проверять транзакции в режиме реального времени, либо с определенным интервалом [24], [25]. Также система ИИ может проверять все операции, либо только определенные [24], [25]. Для системы ИИ возможно установить и количество, и перечень источников, которыми она будет пользоваться [24]. По аналогии с концепциями непрерывной отчетности и непрерывного аудита компания может рассмотреть опцию внедрения “непрерывной информированности” и “непрерывного мониторинга”. Корпоративные политики, кодексы и регламенты, составленные для автономных систем ИИ в составе смешанного совета директоров, должны отвечать на следующие вопросы: каков перечень источников информации, какова регулярность обновления источников, данных, и моделей, каков каталог необходимых активностей.

Назначение на должность директора

Принципы G20/ОЭСР предлагают при назначении физического лица директором учитывать его “соответствующие знания, компетенцию и опыт” [14]. Например, в Кодексе корпоративного управления Саудовской Аравии указано, что информация о номинируемых на должность директора кандидатах должна раскрывать “опыт, квалификацию, навыки и их предыдущие и текущие места работы и членства” [26]. Также предусмотрено требование, что кандидат “должен иметь академическую квалификацию и надлежащие профессиональные и личные навыки, а также соответствующий уровень подготовки и практический опыт” [26]. В настоящее время многие крупные банки запрещают сотрудникам использовать систему ChatGPT в бизнес-целях в связи с ее “неточностью и законодательными проблемами” [27]. Корпоративные политики, кодексы и регламенты, составленные для автономной системы в составе смешанного совета директоров, должны отвечать на следующие вопросы: по каким параметрам выбирается система ИИ, какие тесты или экзамены она должна пройти.

Оценка деятельности СД

В Принципах G20/ОЭСР указывается, что “советы директоров должны проводить регулярную оценку своей деятельности и определять, обладают ли они необходимым сочетанием опыта и компетенций” [14]. Принципы G20/ОЭСР предполагают, что “с помощью тренингов” [14] члены СД могут поддерживать необходимый уровень знаний. Для автономной системы необходимы не курсы и тренинги, а регулярное обновление данных и алгоритмов. Поэтому корпоративные политики, кодексы, и регламенты, составленные для автономных систем

ИИ в составе смешанного совета директоров должны отвечать на следующие вопросы: как часто, в каком объеме, на базе каких источников должно проводиться обновление алгоритмов и данных.

Сотрудничество

Для смешанного совета директоров необходимо предусмотреть методы эффективной коммуникации между автономными системами ИИ и другими заинтересованными лицами (директорами, акционерами, менеджерами, сотрудниками, и т. д.). Физические лица обычно работают в соответствии с распорядком трудового дня. Такая периодичность оправдана для распределения эффективной нагрузки для физических лиц, но не имеет смысловой нагрузки для определения режима работы автономной системы ИИ, которая может работать круглосуточно. Также меняется само понятие деловых встреч и эффективной коммуникации. Автономная система ИИ будет использовать для общения цифровой интерфейс: «чат-боты (например, разговорный ИИ через аудио или текст), визуальные голограммы, виртуальную или дополненную реальность» [28].

Лучшие практики формулирования дополнительного операционного контекста для автономных систем ИИ в дельнейшем могут быть обобщены и использованы в законодательной деятельности. Можно было бы предположить, что физические лица также предпочтут использовать более точные формулировки, созданные для автономных систем, но физические лица не смогут обработать необходимый объем данных.

Заключение

В настоящее время законодатели, разработчики, и исследователи в области искусственного интеллекта стоят перед выбором: нужно ли создавать специальные условия для функционирования автономных систем искусственного интеллекта или они могут функционировать в том же операционном контексте, что обычные люди. Иными словами, можно ли рассматривать автономные системы как автомобиль, который может использоваться на автотрассе общего пользования, или это скорее поезд, самолет, или ракета, и для эффективного использования таких систем нужна выделенная инфраструктура.

Анализ аварийных ситуаций на транспорте [29] однозначно показывает, что несмотря на несопоставимую мощность и скорость, авиатранспорт и железнодорожный транспорт в несколько раз безопаснее автомобилей. Огромную и безопасную, по меркам автомобильного транспорта, скорость и мощность самолетам и поездам позволяет достигать выделенная инфраструктура: железнодорожные пути, вокзалы, аэропорты и воздушные коридоры. Такой же принцип повышения безопасной эффективности за счет выделенной инфраструктуры уже частично применяется в области алгоритмического и высокочастотного трейдинга и может применяться для других автономных систем ИИ.

В области корпоративного управления значительная часть инфраструктуры создается в виде внутренних нормативных актов компании. Локальные нормативные акты, которые предусматривают специфику совместной работы физических лиц и автономных систем ИИ, могут стать базой для формирования основ соответствующего законодательства, регулирующего разработку и внедрение автономных систем ИИ.

Библиографический список

1. Livermore M.A. Rule by Rules // *Computational Legal Studies: The Promise and Challenge of Data-Driven Research*. Edward Elgar Publishing, 2020. Pp. 238–264.
2. Hoffmann-Riem W. Legal Technology/Computational Law: Preconditions, Opportunities and Risks // *Journal of Cross-disciplinary Research in Computational Law*. 2020. Vol. 1. No. 1. Pp. 1–16.
3. Wolfram S. Talking about the Computational Future at SXSW 2013: Stephen Wolfram Blog. URL: <http://blog.stephenwolfram.com/2013/03/talking-about-the-computational-future-at-sxsw-2013/> (дата обращения 24.06.2024).
4. Wolfram S. Computational Law, Symbolic Discourse, and the AI Constitution // *Ethics of Artificial Intelligence* / Ed.: S. Matthew Liao. New York, Oxford Academic, 2020. Pp. 155–180.
5. Business Insider. A Venture Capital Firm Just Named An Algorithm To Its Board Of Directors – Here’s What It Actually Does. 13 May 2014. URL: <https://www.businessinsider.com/vital-named-to-board-2014-5> (дата обращения 24.06.2024).
6. Heyn H., Subbiah P., Linder J. et al. Setting AI in context: A case study on defining the context and operational design domain for automated driving // *International Working Conference on Requirements Engineering: Foundation for Software Quality*. 2022. Pp.199–215.
7. SAE International Recommended Practice, Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles: SAE Standard J3016_201609. Revised September 2016. Issued January 2014. URL: https://saemobilus.sae.org/content/j3016_201609 (дата обращения 24.06.2024).
8. BSI BS PAS 1883-2020 Operational Design Domain (ODD) taxonomy for an automated driving system (ADS) – Specification.
9. Ethics of Connected and Automated Vehicles. Recommendations on road safety, privacy, fairness, explainability and responsibility. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020. URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2777/93984> (дата обращения 24.06.2024).
10. Torbert P.M. Globalizing Legal Drafting: What the Chinese Can Teach Us About Eiusdem Generis and All that // *The Scribes Journal of Legal Writing*. 2007. P. 41. URL: <https://ssrn.com/abstract=2263387> (дата обращения 24.06.2024).

11. Lin P. Why Ethics Matters for Autonomous Cars // *Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte* / Eds: Markus Maurer, J. Christian Gerdes, Barbara Lenz, Hermann Winner. Springer Vieweg Berlin, Heidelberg, 2015. Pp. 69-75.

12. Awad E., Dsouza S., Kim R. et al. The Moral Machine experiment // *Nature*. 2018. Vol. 563. Pp.59-64.

13. Gerner-Beuerle C. Algorithmic Trading and the Limits of Securities Regulation // *Digital Finance in Europe: Law, Regulation, and Governance* / Eds: Emiliós Avgouleas, Heikki Marjosola. Berlin, Boston: De Gruyter, 2022. Pp. 109-140.

14. OECD Legal Instruments. Recommendation of the Council on Principles of Corporate Governance. 2023. URL: <https://legalinstruments.oecd.org/en/instruments/OECD-LEGAL-0413> (дата обращения: 24.06.2024).

15. Millar J. 2017. Ethics Settings for Autonomous Vehicles // *Robot Ethics 2.0* / Eds: P. Lin, K. Abney, R. Jenkins. New York: Oxford University Press, 2017. Pp. 20-34.

16. Lin P. Is tesla responsible for the deadly crash on auto-pilot? Maybe. *Forbes*, July, 1, 2016. URL: <https://www.forbes.com/sites/patricklin/2016/07/01/is-tesla-responsible-for-the-deadly-crash-on-auto-pilot-maybe/> (дата обращения 24.06.2024).

17. Zuiderveen Borgesius F.J. Strengthening legal protection against discrimination by algorithms and artificial intelligence // *The International Journal of Human Rights*. 2020. Vol. 24. Pp. 1572-1593.

18. Geisslinger M., Poszler F., Lienkamp M. An ethical trajectory planning algorithm for autonomous vehicles // *Nature Machine Intelligence*. 2023. Vol. 5. Pp. 137-144.

19. Persad G., Wertheimer A., Emanuel E.J. Principles for allocation of scarce medical interventions // *The Lancet*. 2009. Vol. 373 (9661). Pp. 423-431.

20. IPCG. Corporate Governance Code 2018. URL: <https://www.ecgi.global/publications/codes/corporate-governance-code-2018-revised-in-2023> (дата обращения: 24.06.2024).

21. Vasarhelyi M.A., Halper F. The Continuous Audit of Online Systems // *Auditing: A Journal of Practice & Theory*. 1991. Vol. 10(1). Pp. 110-125.

22. Vasarhelyi M.A., Alles M.G., Williams K.T. Continuous Assurance for the Now Economy. The Institute of Chartered Accountants in Australia, 2010. 89 p.

23. KPMG. Astrus Third Party Intelligence. Know your risks. Introducing Astrus Enhanced Due Diligence and Astrus Monitoring. 2016. URL: <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/uk/pdf/2016/10/astrus-third-party-intelligence.pdf> (дата обращения 24.06.2024).

24. KPMG. Unlocking the Potential of RegTech. 2024. URL: <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/ie/pdf/2023/02/ie-regtech-potential.pdf> (дата обращения: 24.06.2024).

25. Jacobs T. ADNOC's New CTO Shares Innovation Philosophy // *Journal of Petroleum Technology*. 2020. Vol. 72(06). Pp. 22-23.

26. CMA. Corporate Governance Regulations. 2023. URL: https://www.ecgi.global/sites/default/files/codes/documents/corporategovernanceregulations1_2023.pdf (дата обращения: 24.06.2024).

27. SCMP. ChatGPT not taking Wall Street jobs as banks crack down on the AI chatbot over inaccuracies, regulatory concerns. 2023. URL: <https://www.scmp.com/tech/tech-trends/article/3211517/chatgpt-not-taking-wall-street-jobs-banks-crack-down-ai-chatbot-over-inaccuracies-regulatory> (дата обращения: 24.06.2024).

28. Murinde V., Rizopoulos E., Zachariadis M. The impact of the FinTech revolution on the future of banking: Opportunities and risks // *International Review of Financial Analysis*. 2022. Vol. 81. Pp. 102-103.

29. Savage I. Comparing the fatality risks in United States transportation across modes and over time // *Research in Transportation Economics*. 2013. Vol. 43. Pp. 9-22.

References

1. Livermore M.A. Rule by Rules. In: *Computational Legal Studies: The Promise and Challenge of Data-Driven Research*. Edward Elgar Publishing; 2020. Pp. 238-264.

2. Hoffmann-Riem W. Legal Technology/Computational Law: Preconditions, Opportunities and Risks. *Journal of Cross-disciplinary Research in Computational Law* 2020;1(1):1-16.

3. Wolfram S. Talking about the Computational Future at SXSW 2013: Stephen Wolfram Blog. (accessed 24.06.2024). Available at: <http://blog.stephenwolfram.com/2013/03/talking-about-the-computational-future-at-sxsw-2013/>.

4. Wolfram S. Computational Law, Symbolic Discourse, and the AI Constitution. In: Matthew Liao, editor. *Ethics of Artificial Intelligence*. New York: Oxford Academic; 2020. Pp. 155-180.

5. A Venture Capital Firm Just Named An Algorithm To Its Board Of Directors – Here's What It Actually Does. 13 May 2014. (accessed 24.06.2024). Available at: <https://www.businessinsider.com/vital-named-to-board-2014-5>.

6. Heyn H., Subbiah P., Linder J. et al. Setting AI in context: A case study on defining the context and operational design domain for automated driving. In: *International Working Conference on Requirements Engineering: Foundation for Software Quality*; 2022. Pp.199-215.

7. SAE International Recommended Practice, Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles: SAE Standard J3016_201609. Revised September 2016. Issued January 2014. (accessed 24.06.2024). Available at: https://saemobilus.sae.org/content/j3016_201609.

8. BSI BS PAS 1883-2020 Operational Design Domain (ODD) taxonomy for an automated driving system (ADS) – Specification.

9. Ethics of Connected and Automated Vehicles. Recommendations on road safety, privacy, fairness, explainability and responsibility. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2020. (accessed 24.06.2024). Available at: <https://data.europa.eu/doi/10.2777/93984>.

10. Torbert P.M. Globalizing Legal Drafting: What the Chinese Can Teach Us About Ejusdem Generis and All that. *The Scribes Journal of Legal Writing* 2007:41. (accessed 24.06.2024). Available at: <https://ssrn.com/abstract=2263387>.
11. Lin P. Why Ethics Matters for Autonomous Cars. In: Markus Maurer, J. Christian Gerdes, Barbara Lenz, Hermann Winner, editors. *Autonomes Fahren. Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*. Springer Vieweg Berlin: Heidelberg; 2015. Pp. 69-75.
12. Awad E., Dsouza S., Kim R. et al. The Moral Machine experiment. *Nature* 2018;563:59-64.
13. Gerner-Beuerle C. Algorithmic Trading and the Limits of Securities Regulation. In: Avgouleas E., Marjosola H., editors. *Digital Finance in Europe: Law, Regulation, and Governance*. Berlin, Boston: De Gruyter; 2022. Pp. 109-140.
14. OECD Legal Instruments. Recommendation of the Council on Principles of Corporate Governance. (accessed 24.06.2024). Available at: <https://legalinstruments.oecd.org/en/instruments/OECD-LEGAL-0413>.
15. Millar J. Ethics Settings for Autonomous Vehicles. In: Lin P., Abney K., Jenkins R., editors. *Robot Ethics 2.0*. New York: Oxford University Press; 2017. Pp. 20–34.
16. Lin P. Is tesla responsible for the deadly crash on auto-pilot? Maybe. *Forbes*; July, 1, 2016. (accessed 24.06.2024). Available at: <https://www.forbes.com/sites/patricklin/2016/07/01/is-tesla-responsible-for-the-deadly-crash-on-auto-pilot-maybe/>.
17. Zuiderveen Borgesius F.J. Strengthening legal protection against discrimination by algorithms and artificial intelligence. *The International Journal of Human Rights* 2020;24:1572-1593.
18. Geisslinger M., Poszler F., Lienkamp M. An ethical trajectory planning algorithm for autonomous vehicles. *Nature Machine Intelligence* 2023;5:137-144.
19. Persad G., Wertheimer A., Emanuel E.J. Principles for allocation of scarce medical interventions. *The Lancet* 2020;373(9661):423-431.
20. IPCG. Corporate Governance Code 2018. (accessed 24.06.2024). Available at: <https://www.ecgi.global/publications/codes/corporate-governance-code-2018-revised-in-2023>.
21. Vasarhelyi M.A., Halper F. The Continuous Audit of Online Systems. *Auditing: A Journal of Practice & Theory* 1991;10(1):110-125.
22. Vasarhelyi M.A., Alles M.G., Williams K.T. Continuous Assurance for the Now Economy. The Institute of Chartered Accountants in Australia; 2010.
23. KPMG. Astrus Third Party Intelligence. Know your risks. Introducing Astrus Enhanced Due Diligence and Astrus Monitoring; 2016. (accessed 24.06.2024). Available at: <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/uk/pdf/2016/10/astrus-third-party-intelligence.pdf>.
24. KPMG. Unlocking the Potential of RegTech; 2024. (accessed 24.06.2024). Available at: <https://assets.kpmg.com/content/dam/kpmg/ie/pdf/2023/02/ie-regtech-potential.pdf>.
25. Jacobs T. ADNOC's New CTO Shares Innovation Philosophy. *Journal of Petroleum Technology* 2020;72(06):22-23.
26. CMA. Corporate Governance Regulations; 2023. (accessed 24.06.2024). Available at: https://www.ecgi.global/sites/default/files/codes/documents/corporategovernanceregulations1_2023.pdf.
27. SCMP. ChatGPT not taking Wall Street jobs as banks crack down on the AI chatbot over inaccuracies, regulatory concerns; 2023. (accessed 24.06.2024). Available at: <https://www.scmp.com/tech/tch-trends/article/3211517/chatgpt-not-taking-wall-street-jobs-banks-crack-down-ai-chatbot-over-inaccuracies-regulatory>.
28. Murinde V., Rizopoulos E., Zachariadis M. The impact of the FinTech revolution on the future of banking: Opportunities and risks. *International Review of Financial Analysis* 2022;81:102-103.
29. Savage I. Comparing the fatality risks in United States transportation across modes and over time. *Research in Transportation Economics* 2013;43:Pp. 9-22.

Сведения об авторе

Романова Анна Сергеевна – эксперт в области цифровой трансформации, к.э.н., MBA, LL.M, ALM, FCCA, свыше 15 лет опыта работы в крупнейших российских и международных компаниях. Аспирант МФТИ по направлению “Искусственный интеллект и машинное обучение”, Москва, Российская Федерация, e-mail: romanova.as@phystech.edu.

About the author

Anna S. Romanova, expert in the area of digital transformation, Ph.D., MBA, LL.M, ALM, FCCA, over 15 years of experience in the largest Russian and international companies. Postgraduate student at MIPT in the field of Artificial Intelligence and Machine Learning, Moscow, Russian Federation, e-mail: romanova.as@phystech.edu.

Вклад автора

Романовой А.С. предложена концепция выделенного операционного контекста для автономных систем искусственного интеллекта. Разработанный метод использован для формирования выделенного операционного контекста при разработке и внедрении автономных систем управления корпорациями на примере автономных систем ИИ для советов директоров.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Оценки пределов вероятности неправильной классификации на примере прогнозирования опасных отказов

Evaluating the limits of misclassification probability. Case study of hazardous failure prediction

Шебе Х.², Шубинский И.Б.^{1*}, Розенберг Е.Н.¹
Schäbe H.², Shubinski I.B.^{1*}, Rozenberg E.N.¹

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

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

²TÜV Rheinland InterTraffic, Кёльн, Германия

²TÜV Rheinland InterTraffic, Cologne, Germany

*igor-shubinsky@yandex.ru



Шебе Х.



Шубинский И.Б.



Розенберг Е.Н.

Резюме. Постановка задачи. Многие системы искусственного интеллекта по существу являются системами классификации событий. Они широко используются в предиктивной аналитике. Их роль непрерывно растет при прогнозировании опасных событий на транспорте. Эффективность применения методов искусственного интеллекта в значительной мере зависит от результатов неправильной классификации. Поэтому актуальна задача вычисления или оценки в статистическом смысле вероятности неправильной классификации и определения ее граничных значений. **Цель.** Оценить границы для комбинированной вероятности неправильной классификации из-за двух различных категорий ошибок: собственно ошибок неправильной классификации и статистических ошибок, возникающих вследствие неправильной классификации. **Результаты.** Выполнена статистическая оценка порогового значения, которое используется для классификации. Установлены граничные условия для комбинированной вероятности неправильной классификации. Представлено обобщение на N-мерные пространства и на произвольные распределения и формы пороговых поверхностей. Теоретические результаты проиллюстрированы примером практического применения.

Abstract. Problem definition. Many artificial intelligence systems are essentially event classification systems. They are widely used in predictive analytics. Their role as predictors of hazardous events in transportation is constantly growing. The efficient application of artificial intelligence methods largely depends on the results of misclassification. Therefore, the problem associated with the calculation or statistical evaluation of the probability of misclassification and boundary value definition is of relevance. **Aim.** To estimate the boundaries for the combined probability of misclassification due to two different categories of errors, i.e., misclassifications proper and statistical errors resulting from misclassification. **Results.** The threshold value that is used for classification was statistically evaluated. The boundary conditions for the combined probability of misclassification were established. A generalization for N-dimensional spaces and general distributions and shapes of threshold surfaces was presented. The theoretical findings were illustrated with an example of practical application.

Ключевые слова: искусственный интеллект, классификация событий, пороговое значение, статистическая ошибка, вероятность неправильной классификации, предиктивный анализ

Keywords: artificial intelligence, classification of events, threshold value, statistical error, probability of misclassification, predictive analysis

Для цитирования: Шебе Х., Шубинский И.Б., Розенберг Е.Н. Оценки пределов вероятности неправильной классификации на примере прогнозирования опасных отказов // Надежность. 2024. №3. С. 18-23. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-3-18-23>

For citation: Schäbe H., Shubinski I.B., Rozenberg E.N. Evaluating the limits of misclassification probability. Case study of hazardous failure prediction. Dependability 2024;3:18-23. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-3-18-23>

Поступила: 05.03.2024 / **После доработки:** 19.05.2024 / **К печати:** 09.09.2024
Received on: 05.03.2024 / **Revised on:** 19.05.2024 / **For printing:** 09.09.2024

Введение

Многие системы искусственного интеллекта по сути дела являются системами классификации событий. В статье обсуждаются возможности, вычисления или оценки в статистическом смысле вероятности неправильной классификации и определения ее граничных значений.

Системы классификации широко используются в предиктивной аналитике. Их роль непрерывно растет при прогнозировании опасных событий на транспорте. В основном это статистические системы. Опишем математически эту проблему. В простейшем случае имеется величина, скажем X . В зависимости от того, меньше или больше X определенного порога, скажем ξ , объект, описанный значением X , относится к одному из двух классов – A или B .

Теперь необходимо решить несколько задач. Первая – оценка порогового значения ξ на основе выборки данных. Вторая – проверка процедуры классификации с помощью другой выборки и оценка вероятности неправильной классификации. Рассматривая вероятность неправильной классификации, необходимо учитывать два аспекта. Первый заключается в том, что сама процедура классификации является статистической, второй – в том, что пороговое значение ξ , а также вероятность неправильной классификации оцениваются по выборкам, то есть являются случайными величинами.

В первом разделе описана модель задачи классификации. Второй раздел посвящен статистической оценке порогового значения, которое используется для классификации.

В третьем разделе рассмотрены две различные категории статистических ошибок: собственно ошибка неправильной классификации и статистическая ошибка, возникающая из-за неправильной классификации. Затем определяются границы для этой комбинированной вероятности неправильной классификации.

В четвертом разделе представлено обобщение на n -мерные пространства и на произвольные распределения и формы пороговых поверхностей. В пятом разделе представлен пример практического применения теории.

1. Модель

Модель задачи классификации может быть описана следующим образом. Предположим, что существуют два различных класса – A и B . В зависимости от того, значение X_i , определенное в интервале $[0, 1]$, больше или меньше порогового значения ξ , элемент принадлежит к классу A или классу B . Значение ξ в общем случае неизвестно.

Мы наблюдаем пары значений X_i, d_i . Значения X_i лежат в интервале $[0, 1]$, а индикаторы d_i принимают значение A или B . Для упрощения задачи предположим, что X_i равномерно распределены по интервалу $[0, 1]$.

2. Оценка порогового значения

Оценка порогового значения может быть выполнена с помощью порядковых статистик. Сначала предположим, что выборка $\{(X_i, d_i), i = 1, \dots, n\}$ разделена на две подвыборки

$$X_{a,i}, i = 1, \dots, n_a \text{ и } X_{b,i}, i = 1, \dots, n_b.$$

Таким образом, показатели d_i в подвыборках всегда принимают значение A или B , в зависимости от номера подвыборки.

В рассматриваемом простом случае известно, что для порядковых статистик выполняется неравенство

$$X_{a,n} < \xi < X_{b,1}.$$

Теперь имеется следующий результат, (см., например, [1])

$$P(|X_{r,n-r} / (n+1) - \xi| > \epsilon) \leq o(1)/(n\epsilon^2).$$

Это означает, что экстремальные статистики $X_{b,1:n}$ и $X_{a,n:n}$ сходятся с точностью $1/n$ к предельному значению.

Таким образом, для заданной вероятности p и объема выборки n точность ϵ можно оценить как величину порядка $o((np)^{-1/2})$.

3. Вычисление общей вероятности неправильной классификации

Рассмотрим следующую ситуацию. Пусть M – событие неправильной классификации. Для задачи классификации всегда есть пороговое значение, скажем ξ , для процедуры классификации, которое оценивается по данным. Выбирается ошибка первого рода α . В качестве оценки значения ξ будет использован верхний доверительный предел, соответствующий вероятности $1 - \alpha$.

Правилом классификации будет отнесение объекта к рассматриваемому классу A , если его наблюдаемая случайная величина X удовлетворяет условию $X < \xi$.

Тогда нужно различать две следующие ситуации:

а) нулевая гипотеза H_0 верна, и вероятность ошибочной классификации равна $P(M|H_0)$. Это событие происходит с вероятностью $1 - \alpha$;

б) нулевая гипотеза неверна в том смысле, что предполагаемое пороговое значение больше. Тогда вероятность ошибочной классификации будет обозначаться как $P(M|H_a)$. Это событие происходит с вероятностью α .

Общая вероятность неправильной классификации может быть вычислена как взвешенная сумма обеих частей, т.е.

$$P(M) = \alpha \cdot P(M|H_a) + (1 - \alpha) \cdot P(M|H_0). \quad (1)$$

Вероятность $P(M|H_a)$ неизвестна и ее трудно определить.

Мы видим, что выполняются следующие два неравенства (2) и (3)

$$P(M) \leq \alpha + (1 - \alpha) \cdot P(M|H_0), \quad (2)$$

(см. [2] и дальнейшее развитие в [3]). Эта оценка очень консервативна. Кроме того,

$$P(M) \geq \alpha \cdot P(M|H_o) + (1 - \alpha) \cdot P(M|H_a) = P(M|H_o) \quad (3)$$

является оптимистической оценкой. Она предполагает, что ошибка классификации при гипотезе H_a такая же, как и при гипотезе H_o .

Для оценки значения вероятности $\alpha \cdot P(M|H_a)$ используется тот факт, что вероятности не известны, но они оцениваются по выборке. Здесь применима биномиальная схема: из n экспериментов k оказываются успешными.

Это означает, что точечная оценка для $P(M|H_o)$ равна $p = k/n$.

Эта оценка асимптотически (для больших n) нормально распределена с оценкой среднего p и оценкой дисперсии

$$\sigma^2 = \frac{p(1-p)}{n}.$$

Распределение p будем обозначать через $f(\cdot)$.

Таким образом, верхняя доверительная граница для $P(M|H_o)$ составляет

$$\gamma = p + z_{1-\alpha} \sigma,$$

где $z_{1-\alpha}$ обозначает $1 - \alpha$ квантиль стандартного нормального распределения.

Для того, чтобы оценить вероятность $\alpha \cdot P(M|H_a)$, нужно вычислить интеграл

$$\int_{\gamma}^{\infty} x f(x) dx.$$

Это дает

$$\int_{(\gamma-m)/\sigma}^{\infty} (m + z\sigma) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2} dz = m \left(1 - \Phi((\sigma - m)/\sigma) \right) + \sigma e^{-\gamma^2/2} / \sqrt{2\pi}, \quad (4)$$

где $\Phi(\cdot)$ – интеграл стандартного нормального распределения.

Используя результат Феллера [4, глава 7, § 1, лемма 2], получим для первого члена (4)

$$\left(1 - \Phi((\sigma - m)/\sigma) \right) < \sigma e^{-\frac{(\gamma-m)^2}{2}} / \left(\sqrt{2\pi} (\gamma - m) \right).$$

Используя неравенство $\sigma \leq \sqrt{\frac{m}{n}}$, имеем для второго члена из (4)

$$\sqrt{\frac{m}{n}} e^{-\gamma^2/2} / \sqrt{2\pi}.$$

Это приводит к следующей границе

$$\alpha P(M | H_o) < \frac{m}{z_{1-\alpha} \sqrt{2\pi}} e^{-z_{1-\alpha}^2} + \frac{m}{\sqrt{2\pi n}} e^{-\gamma^2/2}.$$

Мы можем полагать m приблизительно равным γ , чтобы получить численную оценку границы. Это консервативно, поскольку $m < \gamma$. Это дает

$$\alpha P(M | H_o) < \frac{\gamma}{z_{1-\alpha} \sqrt{2\pi}} e^{-z_{1-\alpha}^2} + \frac{\gamma}{\sqrt{2\pi n}} e^{-\gamma^2/2}. \quad (5)$$

В следующих таблицах (табл. 1 и табл. 2) приведены численные границы для обоих членов в (5).

Табл. 1. Значения для первого члена в (5)

$\alpha \backslash \gamma$	0,1	0,01	0,001	0,0001
0,1	0,01369421	0,00136942	0,00013694	$1,3694 \times 10^{-5}$
0,05	0,0062702	0,00062702	$6,2702 \times 10^{-5}$	$6,2702 \times 10^{-6}$
0,01	0,00114567	0,00011457	$1,1457 \times 10^{-5}$	$1,1457 \times 10^{-6}$
0,005	0,00056136	$5,6136 \times 10^{-5}$	$5,6136 \times 10^{-6}$	$5,6136 \times 10^{-7}$
0,001	0,00010896	$1,0896 \times 10^{-5}$	$1,0896 \times 10^{-6}$	$1,0896 \times 10^{-7}$

Табл. 2. Значения для второго члена в (5)

$n \backslash \gamma$	0,1	0,01	0,001	0,0001
100	0,00396953	0,00039892	$3,9894 \times 10^{-5}$	$3,9894 \times 10^{-6}$
1000	0,00125527	0,00012615	$1,2616 \times 10^{-5}$	$1,2616 \times 10^{-6}$
10 000	0,00039695	$3,9892 \times 10^{-5}$	$3,9894 \times 10^{-6}$	$3,9894 \times 10^{-7}$
100 000	0,00012553	$1,2615 \times 10^{-5}$	$1,2616 \times 10^{-6}$	$1,2616 \times 10^{-7}$

Данные таблицы показывают, что для порядка $n = 10\,000$ и вероятности α приблизительно равной γ , член ограничен примерно значением $\gamma/6$.

$$P(M) = \alpha \cdot P(M|H_o) + (1 - \alpha) \cdot P(M|H_a) < (1 - \alpha + 1/6) \cdot P(M|H_o) \quad (6)$$

для практических значений α и n .

В некоторых случаях отклонение вызвано не тем, что пороговое значение больше доверительного значения при гипотезе H_o , а тем, что оно больше из-за альтернативной гипотезы. В этих случаях альтернативная гипотеза должна быть как-то определена. Эвристически можно использовать коэффициент 5. Поскольку величина γ является линейным коэффициентом в (5), то допустимо результаты в табл. 1 и 2 умножить на этот коэффициент, чтобы учесть альтернативную гипотезу. Это даже консервативно, поскольку член $\exp(-\gamma^2/2)$ в (5) меньше 1.

Тогда выражение (6) изменится на следующее

$$P(M) = \alpha \cdot P(M|H_o) + (1 - \alpha) \cdot P(M|H_a) < (1 - \alpha + 5/6) \cdot P(M|H_o) < 2P(M|H_o). \quad (7)$$

Это означает, что даже в самом консервативном случае можно удвоить значение $P(M|H_o)$ для «нормальной» ошибки классификации, которая вычисляется без учета статистических влияний, вызванных оценкой величины, чтобы покрыть разброс и даже альтернативные гипотезы.

4. Обобщение теоретических результатов

В этом разделе обсуждается, возможность расширения теории, представленной в разделе 3, с простейшего одномерного случая с двумя классами на более общие случаи.

4.1. Произвольное распределение в одномерном случае

В предыдущем разделе рассмотрен одномерный случай с равномерным распределением характеристик. Пусть $F(\cdot)$ – непрерывная и монотонная функция распределения, тогда при преобразовании $X = F(X')$, задача может быть преобразована к задаче с произвольно распределенными значениями X' . Все рассуждения, приведенные выше, остаются в силе.

4.2. Несколько классов

Бывают также ситуации, когда в классификации используется несколько классов. Тогда нам придется рассматривать классы $A, B, C, \dots$ с пороговыми значениями $\xi_1, \xi_2, \xi_3, \dots$ между этими классами. Описанные выше методы нужно просто повторить для каждого класса.

4.3. Двумерный случай

В этом случае дополнение выборка состоит из пар значений (X_i, Y_i) . Для упрощения рассуждений полагаем, что они распределены равномерно в пространстве событий $U[0, 1] \times U[0, 1]$.

Границы между областями – это прямые линии, заданные уравнением $\xi_i y + \xi'_i x = 0$.

Преобразование к произвольным распределениям выполняется с помощью

$$X = F_x(X', Y'), Y = F_y(X', Y'),$$

где соответствующие распределения непрерывны и монотонны, что обеспечивает их отображение один к одному.

4.4. N-мерный случай

Эти рассуждения можно распространить и на N -мерный случай. Тогда значения принимают вид $X' = (X'_1, X'_2, \dots, X'_m)$, где $X'_1, X'_2, \dots$ описывают компоненты N -мерного вектора. Здесь имеет место m -мерный вектор в m -мерном евклидовом пространстве.

Границами между областями признаков снова являются $N-1$ мерные подпространства (гиперповерхности), определяемые уравнением $X'^{\circ} \xi_i = 0$. Здесь X' и ξ_i – N -мерные вектора и символ « $\circ$ » обозначает скалярное произведение.

4.5. Обобщение на произвольные формы границ

Пусть дано преобразование $T(\cdot)$ из пространства V^m в V'^m и наоборот. Пусть преобразование непрерывно, инвертируемо и измеримо в обоих пространствах.

V'^m и V^m – метрические и сепарабельные пространства.

Тогда векторное преобразование $x' = T(x'')$ разложимо по базису $g_j(\cdot)$, т.е. $x'_i = b_{ij} \cdot g_j(x''_j)$.

Индекс суммирования j идет от 1 до фиксированного значения r , так что достигается достаточная точность. Заметим, что в общем случае базис счетен, но имеет бесконечный размер.

Теперь значения r и b_{ij} можно оценить с помощью функции потерь. Это должно привести к созданию машины опорных векторов (см. Вапник [5]).

Сходимость этих оценок для r и b_{ij} теперь будет порядка $n^{1/2}$.

Примечание: Для определения оптимального значения параметра r можно использовать аналог информационного критерия Акаике (AIC) [6] или функцию потерь, предложенную Вапником [7].

5. Пример

В этом разделе показана возможность применения описанной ранее теории. Мы используем данные из предыдущей работы Шубинский и др. [8], где для трех российских железных дорог был проведен прогнозный анализ потенциально опасных отказов путевых систем с помощью алгоритма XGBoost. В этом анализе данные за месяц использовались для прогнозирования поведения системы в течение следующего месяца.

Системы были помечены индикатором, который имеет значение «1», если система склонна к опасным событиям, и «0» в противном случае. Потенциально опасной может быть ситуация, когда система имеет значение «1», но прогноз дает значение «0». Используя данные из табл. 2 (Шубинский и др. [8]), мы получаем следующую табл. 3.

Табл. 3. Вероятности неправильной классификации

Железная дорога	Горьковская ж/д	Северная ж/д	Куйбышевская ж/д
FN	1031	1808	1154
n	5058	8081	4700
$P(M)$	0,4077	0,4475	0,4911

В табл. 3 представлены ложноотрицательные результаты (FN) и общее количество событий (n), а также вероятность неправильной классификации $P(M)$, рассчитанная по формуле (6). Вероятность ошибочной классификации также учитывает, что нулевая гипотеза может оказаться неверной, а альтернатива может быть применима, где мы сделали эвристические предполо-

жения для альтернативы. Это приводит к достаточно консервативным, но стабильным оценкам вероятности ошибочной классификации.

Кроме того, мы заметили, что количество точек данных для каждой из трех железных дорог довольно велико, так что предположения о большом числе n , сделанные в разделе 3, применимы.

Необходимо дать некоторые пояснения по поводу довольно больших указанных вероятностей неправильной классификации и ответить на вопросы, действительно ли это применимо на практике. Следует учитывать, что не каждый потенциально опасный сразу же приведет к серьезной аварии, поскольку системы постепенно ухудшаются и выходят из строя только при достижении определенного порога. Таким образом, для многих практических приложений необходимо, чтобы несколько неправильных классификаций состояний происходили последовательно. В следующей табл. 4 мы покажем, как вероятность ошибочной классификации уменьшается с ростом числа попыток классификации.

Табл. 4. Вероятности неправильной классификации в зависимости от количества действий при классификации

Количество действий классификации	Горьковская ж/д	Северная ж/д	Куйбышевская ж/д
1	0,4077	0,4475	0,4911
2	0,1662	0,2002	0,2411
3	0,0678	0,0896	0,1184
4	0,0276	0,0401	0,0582
5	0,0113	0,0179	0,0286
6	0,0046	0,0080	0,0140

Цифры, представленные в табл. 4, показывают, как общая вероятность ошибочной классификации уменьшается с ростом числа классификаций, и в этом заключается достоинство многих диагностических подходов. Даже если одна операция классификации может быть ошибочной со значительной вероятностью, большое количество диагностических действий вместе с последовательной классификацией дает достаточно малую вероятность ошибочной классификации. Следует также отметить, что применяемая формула (6) является очень консервативной оценкой.

Заключение

В данной работе показана возможность оценки границ различных областей в системе классификации. Кроме того, показана возможность определения вероятности неправильной классификации, принимая во внимание сам процесс оценки вероятности неправильной классификации. Это улучшенная оценка по сравнению с результатами исследований Braband и Schäbe [2].

Представлен метод обобщения результатов на N -мерный случай при произвольных границах различных областей, используемых для классификации. В данной работе продемонстрирована применимость этого метода на примере предиктивного анализа опасных событий на инфраструктуре трех железных дорог России. Этот результат свидетельствует о возможностях применения предложенного метода в системах предиктивной диагностики. Одним из возможных направлений развития метода может быть решение задач оценки многоуровневой безопасности системы.

Библиографический список

1. Лидбеттер М., Линдгрэн Г., Ротцен Х. Экстремумы случайных последовательностей и процессов. М.: Мир, 1989. 392 с.
2. Braband J., Schäbe H. On safety assessment of artificial intelligence // *Dependability*. 2020. No. 4. Pp. 25-34.
3. Braband J., Schäbe H., The application of artificial intelligence in railway technology for safety-relevant applications – opportunities and problems // *Signalling and Datacommunication*. 2022. Vol. (114)5. Pp. 14-21.
4. Feller W.A. Introduction to Probability Theory and Its Application. J. Wiley & Sons, 1970.
5. Vapnik V.N. The Nature of Statistical Learning Theory / 2nd Edition. Springer, 1999. XX, 314 p.
6. Akaike H. A new look at the statistical model identification // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 1974. Vol. 19(6). Pp. 716-723.
7. Вапник В.Н., Червоненкис А.Я. О равномерной сходимости частот появления событий к их вероятностям // Докл. АН СССР. 1968. Т. 181. № 4. С. 781-783.
8. Shubinsky I.B., Rozenberg E.N., Schäbe H. Innovative Methods of Ensuring the Functional Safety of Train Control Systems // *Reliability Theory & Applications*. 2023. No 4(76). Vol. 18. Pp. 909-920.

References

1. Leadbetter M.R., Lindgren G., Rootzén H. Extremes and related properties of random sequences and processes. Moscow: Mir, 1989.
2. Braband J., Schäbe H. On safety assessment of artificial intelligence. *Dependability* 2020;4:25-34.
3. Braband J., Schäbe H., The application of artificial intelligence in railway technology for safety-relevant applications – opportunities and problems. *Signalling and Datacommunication* 2022;(114)5:14-21.
4. Feller W.A. Introduction to Probability Theory and Its Application. J. Wiley & Sons; 1970.
5. Vapnik V.N. The nature of statistical learning theory. 2nd Edition. Springer; 1999.
6. Akaike H. A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control* 1974;19(6):716-723.

7. Vapnik V.N., Červonenkis A.Ja. The uniform convergence of frequencies of the appearance of events to their probabilities. *Dokl. Akad. Nauk SSSR* 1968;181(1968):781-783. (in Russ.)

8. Shubinsky I.B., Rozenberg E.N., Schäbe H. Innovative Methods of Ensuring the Functional Safety of Train Control Systems. *Reliability Theory & Applications* 2023;4(76) (18):909-920.

Сведения об авторах

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

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

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

About the authors

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

Igor B. Shubinsky, Professor, Doctor of Engineering, Deputy Director of Integrated Research and Development

Unit, Research and Design Institute for Information Technology, Signalling, and Telecommunications in Railway Transportation (JSC NIIAS), Moscow, Russian Federation, e-mail: igor-shubinsky@yandex.ru

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

Вклад авторов в статью

Вклад авторов заключается в развитии метода оценки ложных классификаций применимой к разным системам искусственного интеллекта. Шебе Х. развивал математическую теорию. Розенберг Е.Н. представил пример применения метода. Шубинский И.Б. развивал общую концепцию применения систем искусственного интеллекта в диагностике железнодорожных систем.

Authors' contributions to the article

The authors' contribution is the development method to evaluate the probability of a false classification applicable to different artificial intelligence systems. Schebe H. developed the mathematical theory. Rosenberg N. presented an example of the method application. Shubisky I.B. developed the general concept of application of artificial intelligence systems in diagnostics of railway systems.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Применение преобразования Хафа для определения границы путей в задачах компьютерного зрения аппаратно-программного комплекса фиксации исполненного движения

Using Hough transform to define track boundaries as part of machine vision by train traffic-tracking hardware and software systems

Полевский И.С.
Polevskiy I.S.

Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»), Российская Федерация, Москва
Research and Design Institute for Information Technology, Signalling, and Telecommunications in Railway Transportation (JSC NIIS), Russian Federation, Moscow
i.polevskiy@vniias.ru



Полевский И.С.

Резюме. Цель. При решении задач компьютерного зрения для определения границ детектируемого объекта, как правило, используются методы семантической сегментации, которые требуют высокого вычислительного ресурса. Их использование повышает сложность реализации и увеличивает стоимость решений для внедряемых аппаратно-программных комплексов. В настоящей работе предлагается альтернативный метод определения границы сегментируемого объекта, в виде железнодорожного пути, для комплекса фиксации исполненного движения. **Методы.** Так как железнодорожный путь на изображении можно представить линией полинома n -порядка, то для решения задачи детектирования границы пути предлагается использовать приближения в виде прямых линий. В качестве метода детектирования прямых линий предлагается использовать преобразование Хафа, параметрическое пространство которого будет скомпоновано в соответствии с решаемой задачей. **Заключение.** Предложенная аппроксимация позволит отказаться от семантической сегментации и снизит вычислительную сложность нагрузки на аппаратуру.

Abstract. Aim. In the context of machine vision, the problem of detected object boundary definition is usually solved using semantic segmentation that requires a high computational resource. Its application increases the complexity and the cost of the implemented hardware and software systems. This paper proposes an alternative method for defining the boundary of a segmented object, i.e., a railway track, for a train traffic tracking system. **Methods.** Since a railway track in an image can be represented by an n -th order polynomial, it is suggested to solve the problem of track boundary detection by using approximations in the form of straight lines. It is suggested using the Hough transform to detect straight lines. The former's parametric space will be arranged in accordance with the problem to be solved. **Conclusions.** The proposed approximation will allow abandoning semantic segmentation and reduce the computational complexity and load.

Ключевые слова: фиксация исполненного движения, компьютерное зрение, машинное обучение, преобразование Хафа, семантическая сегментация.

Keywords: train traffic tracking, machine vision, machine learning, Hough transform, semantic segmentation.

Для цитирования: Полевский И.С. Применение преобразования Хафа для определения границы путей в задачах компьютерного зрения аппаратно-программного комплекса фиксации исполненного движения // Надежность. 2024. №3. С. 24-33. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-3-24-33>

For citation: Polevskiy I.S. Using Hough transform to define track boundaries as part of machine vision by train traffic-tracking hardware and software systems. Dependability 2024;3:24-33. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-3-24-33>

Поступила: 03.11.2023 / **После доработки:** 14.05.2024 / **К печати:** 09.09.2024
Received on: 03.11.2023 / **Revised on:** 14.05.2024 / **For printing:** 09.09.2024

Введение

АО «НИИАС» разрабатывает Аппаратно-программный комплекс фиксации исполненного движения, далее – АПК ФИД. Технологической задачей разрабатываемого комплекса является автоматическая фиксация приема, отправления и пропуска поездов на станции с помощью средств искусственного интеллекта: решение задач классификации объектов и задач регрессии. Главной целью внедрения комплекса АПК ФИД является реализация и использование методов, которые позволят отказаться от средств и устройств электрической централизации на станции, и оперировать только данными, которые поступают автоматически от устройств оптического видеоконтроля.

Одной из технических обеспечивающих задач комплекса АПК ФИД является задача определения границы железнодорожного пути на изображениях анализируемого видеоряда. Решение такого рода задач, как правило, осуществляется с помощью методов семантической сегментации. Семантическая сегментация – это решение, при котором обеспечивается детальная классификация объекта, где происходит присвоение семантических меток классов для каждого пикселя изображения.

Современные методы семантической сегментации основаны на глубоких сверточных сетях [1]. Например, метод семантической сегментации PSPNet [2] реализован на базе сверточной сети ResNet [3], а метод DeepLabv3 [4] основан на модели сети xception [5]. Применение сверточных сетей в методах семантической сегментации показывает высокую точность сегментирования объектов [2, 4, 6], но имеет и высокую вычислительную сложность, которая напрямую зависит от выбранной архитектуры сверточной сети, количества сверточных слоев и числа обучаемых параметров. При сравнительном анализе [7] применения популярных методов семантической сегментации изображений (PSPNet, DeepLabv3, UNet [8]) на внедряемых аппаратных платформах NVIDIA Jetson было показано, что генерация семантической маски для одного изображения с разрешением 4000×3000 точек может занимать до нескольких секунд. Это ограничивает применение подобных методов для внедряемого комплекса АПК ФИД в силу ограниченной вычислительной мощности оборудования.

Целью данной работы является введение альтернативного метода определения границы железнодорожного пути на изображении. Предлагается использовать метод, который построен на вычислительном алгоритме преобразования Хафа [9]. Данный метод основан на семантике границы детектируемого объекта с помощью геометрических примитивов в виде прямых линий.

Рассмотрение метода

Железнодорожный путь ограничен рельсами, каждый из которых можно представить в виде линии полинома n -порядка при линейной перспективе обрабатываемого

изображения. Степень такого полинома зависит от кривизны пути на заданном масштабе изображения в кадре, где масштаб определяется высотой установки видеокамеры, ее угла обзора и фокусного расстояния. Таким образом, с помощью преобразования Хафа можно выделить границу железнодорожного пути набором прямых линий, определяющих ломаную кривую. Такая ломаная кривая будет являться дискретным представлением исходного полинома линии, который можно получить путем интерполяции с помощью численных методов решения задачи приближения функций¹. На рис. 1 показан пример определения границы железнодорожного пути с помощью преобразования Хафа.

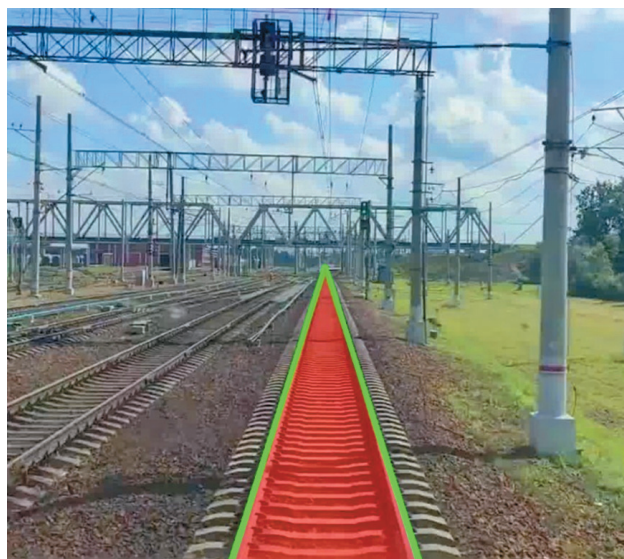


Рис. 1. Пример определения границы железнодорожного пути с помощью преобразования Хафа (красным цветом выделен путь, зеленым цветом показаны прямые линии, определяющие его границы)

Алгоритм преобразования Хафа был запатентован Полем Хафом в 1962 году [9]. Преобразование Хафа применяется для поиска геометрических фигур на растровых изображениях. Алгоритм основан на параметризации пикселей с помощью полярных координат: угла наклона и длины радиус-вектора от заданного центра анализируемого изображения. Результатом преобразования является Хаф-образ (параметрическое пространство). Построение Хаф-образа происходит по формуле (1)

$$\rho = x \cos \theta + y \sin \theta, \quad (1)$$

где ρ – длина радиус-вектора, θ – угол наклона, x – координата пикселя по оси абсцисс, y – координата пикселя по оси ординат.

Класс детектируемой фигуры определяется путем голосования в параметрическом пространстве, где суммируются значения для пикселей с одинаковыми по-

¹ Даутов Р.З., Тимербаев М.Р. Численные методы. Приближение функций: учебное пособие. Казань: Казан. ун-т, 2021. 123 с.

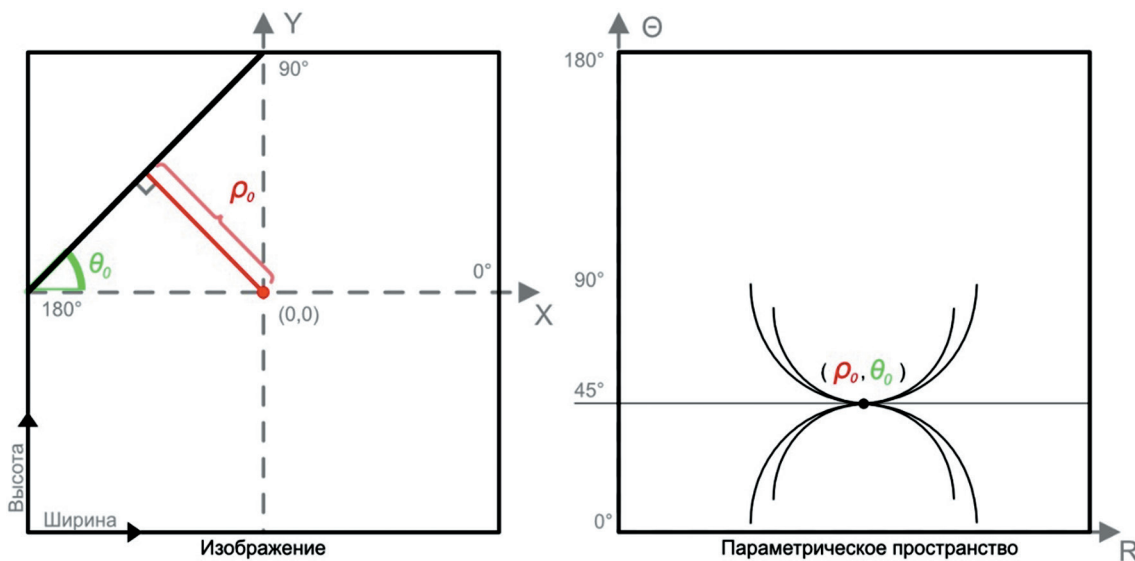


Рис. 2. Визуализация преобразования Хафа для прямой линии

лярными координатами. Голосование выделяет локальные максимумы Хаф-образа, которые задают паттерн искомого объекта. Любая прямая линия на исходном графическом изображении представляется точкой локального максимума в параметрическом пространстве. На рис. 2 показана визуализация преобразования Хафа для прямой линии.

Компоновка пространства Хафа

Преобразование Хафа имеет высокую асимптотическую сложность – $O(N^3)$, а само параметрическое пространство занимает большой объем памяти, так как для каждого пикселя изображения строится вектор значений по каждому рассматриваемому углу наклона θ на промежутке $[0; \pi)$.

На практике существуют методы, позволяющие ускорить построение параметрического пространства Хафа или его приближения. В 1992 году впервые был предложен метод быстрого преобразования Хафа [10], далее – БПХ, который снижает вычислительную сложность построения Хаф-образа за счет использования факта самопересечения рассматриваемых дискретных прямых. Асимптотическая сложность алгоритма БПХ составляет $O(N^2 \log N)$. Также широкое применение находят алгоритмы предварительной обработки растровых изображений, целью использования которых является снижение количества параметризуемых пикселей (бинаризация изображения): оператор Кэнни [11], оператор Собеля [12], алгоритм Брэдли-Рота [13] и др.

Предполагается, что предлагаемый метод будет применяться в составе вычислительного графа предиктивной модели комплекса АПК ФИД, где на вход алгоритма будут переданы бинаризованные карты признаков. Математическим ядром метода выбран классический алгоритм преобразования Хафа, который, в сравнении с БПХ, обладает рядом ключевых преимуществ для решаемой задачи:

1) не имеет рекурсивных операций. Использование рекурсивных операций в общем случае не желательно при параллельных вычислениях на графическом процессоре, требуются их дополнительные преобразования к итеративному виду [14], что может увеличить расход памяти и существенно усложнить конечную реализацию алгоритма;

2) имеет высокую точность работы. В алгоритме БПХ прямая линия параметризуется диадическим шаблоном, который является ее дискретным приближением в рамках растрового изображения, а для классического преобразования Хафа прямая линия – это один параметризованный пиксель. Следовательно, в определенных случаях классический алгоритм имеет более высокую точность работы, так как в нем не используются приближенные методы вычислений;

3) обладает простотой реализации на вычислительном графе. Обучение модели с использованием алгоритма БПХ будет затруднено в виду специфики построения его параметрического пространства: необходимо сохранять всю историю формирования диадических шаблонов согласно условиям и циклам рекурсивного алгоритма.

В рамках данной работы предлагается привести параметрическое пространство Хафа к компактному дискретному виду в заданном диапазоне значений – выполнить его квантование.

Дискретное представление параметрического пространства Хафа предполагает использование интервалов квантования для радиус-вектора ($\Delta\rho$) и для угла наклона ($\Delta\theta$) – формула (2)

$$\hat{\rho} = \frac{\rho}{\Delta\rho}; \hat{\theta} = \frac{\theta}{\Delta\theta}, \quad (2)$$

где $\hat{\rho}$ – квантованный параметр радиус-вектора, $\hat{\theta}$ – квантованный параметр угла наклона, ρ – длина радиус-вектора, θ – угол наклона, $\Delta\rho$ – заданный интервал квантования радиус-вектора, $\Delta\theta$ – заданный интервал квантования угла наклона.

Выбор интервалов квантования напрямую влияет на время построения Хаф-образа и определяет точность детектирования прямых линий, которые будут описывать границы железнодорожного пути на исходном изображении. В комплексе АПК ФИД предполагается установка видеокамер на ригели, которые проходят над путями. Следовательно, получаемое изображение с камеры будет иметь точку линейной перспективы, а прямые линии – неоднородные искажения, зависящие от ориентации и расстояния к центру перспективы. Каждая видеокамера имеет заданную зону интереса, в рамках которой осуществляется контроль расположенных там путей. Таким образом, для решаемой задачи можно выделить два варианта интервалов квантования: линейное и нелинейное. Для линейного квантования будет выбран фиксированный шаг, а для нелинейного подбор шага будет осуществляться в соответствии с зоной интереса и контроля видеокамеры.

Так как длина радиус-вектора ρ определяет смещение прямой линии относительно заданного центра координат изображения, то ошибка интерполяции параметра $\hat{\rho}$ не приведет к пересечению искомой прямой линии и фактической границы пути. Следовательно, для параметра ρ выбран линейный интервал квантования. В таком случае количество уровней квантования (размерность пространства) будет вычисляться по формуле (3)

$$R = \frac{\sqrt{H^2 + W^2}}{\Delta\rho}, \quad (3)$$

где R – количество уровней квантования, H – высота изображения, W – ширина изображения, $\Delta\rho$ – заданный интервал квантования радиус-вектора.

Для угла θ вводятся линейный и нелинейный виды интервалов квантования. Для линейного интервала квантования угла θ количество уровней квантования будет вычисляться в соответствии с формулой (4)

$$\Theta = \frac{\pi}{\Delta\theta}, \quad (4)$$

где Θ – количество уровней квантования, $\Delta\theta$ – заданный интервал квантования угла.

Нелинейный интервал квантования угла θ предполагает выделение зоны интереса, для которой будет повышена разрешающая способность параметрического пространства Хафа. В таком случае число уровней квантования будет задано в соответствии с формулой (4), а характер распределения будет задан логарифмическим законом.

В связи с тем, что в комплексе АПК ФИД анализируемое графическое изображение обладает линейной перспективой, а железнодорожные пути, находящиеся в зоне интереса, расположены близко к вертикальной оси изображения, повышение разрешающей способности будет осуществляется логарифмически от 0 до 90 градусов. Таким образом, предлагается увеличить точность детектирования близких к вертикальным прямым линиям описывающих границу железнодорожного пути

на изображении. Пример определения зоны интереса показан на рис. 3.

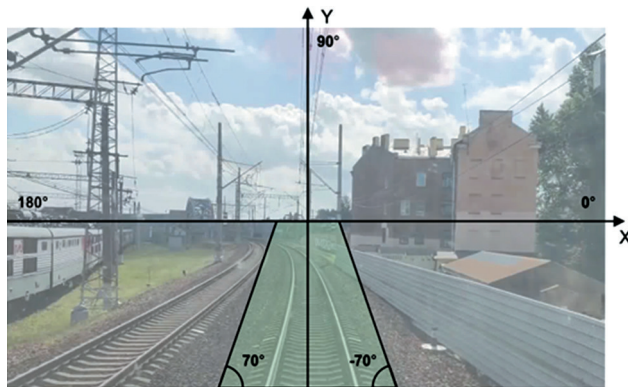


Рис. 3. Пример определения зоны интереса (зона интереса выделена зеленым цветом и определена для прямых линий изображения, угол наклона которых находится в интервале от 90 до 70 градусов)

Для логарифмического интервала квантования вводится основание логарифма, определяющее характер распределения при условии $\theta \in [0; \frac{\pi}{2}]$ – формула (5)

$$b = \left(\frac{\gamma\pi}{2} + 1\right)^{\frac{2}{\Theta}}, \quad (5)$$

где b – расчетное основание логарифма, γ – коэффициент масштабирования, Θ – количество уровней квантования угла.

Функция расчета квантованного значения параметра $\hat{\theta}$ определяется формулой (6), а обратная ей функция интерполяции для расчета угла наклона θ определяется в соответствии с формулой (7)

$$f(\theta) = \frac{\Theta}{2} - \log_b \left(\gamma \left(\frac{\pi}{2} - \theta \right) + 1 \right), \quad (6)$$

$$f^{-1}(\hat{\theta}) = \frac{\pi}{2} - \frac{b^{\left(\frac{\Theta}{2} - \hat{\theta}\right)} - 1}{\gamma}, \quad (7)$$

где θ – угол наклона прямой, $\hat{\theta}$ – квантованное значение угла наклона прямой, Θ – количество уровней квантования угла, b – расчетное основание логарифма, γ – коэффициент масштабирования.

Следует отдельно выделить, что зона интереса применяется для всего анализируемого изображения, то есть логарифмическое распределение будет применено для всех углов прямых линий изображения. Соответственно, низкая разрешающая способность для линий, близких к горизонтальным, даст высокую ошибку интерполяции по сравнению с линейным интервалом квантования углов.

Сравнительный анализ

Конфигурация дискретного параметрического пространства Хафа определяется его гиперпараметрами: размерностью пространства Θ и R , а также коэф-

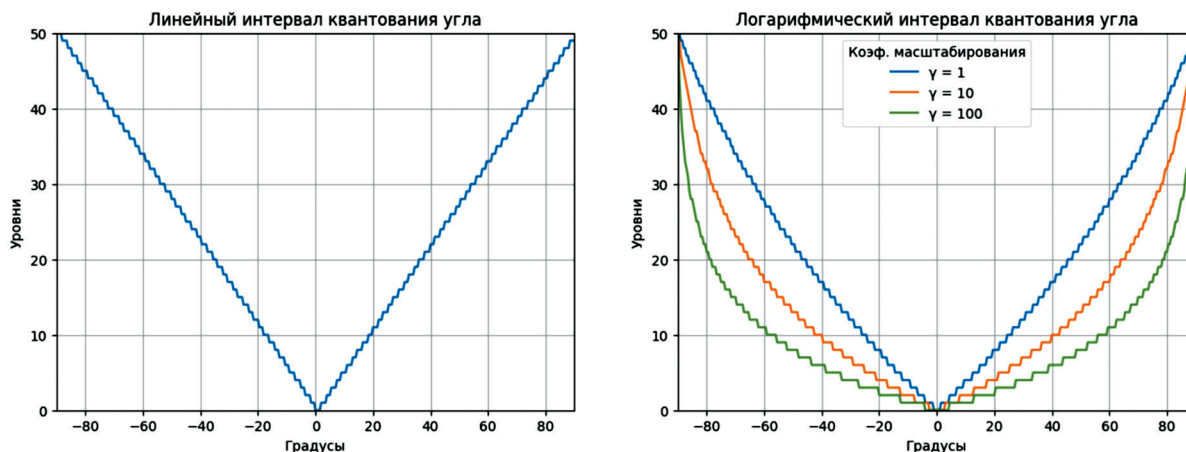


Рис. 4. Разница в распределениях параметризованного угла наклона θ при линейном и нелинейном интервалах квантования (для шага угла 0,5 и заданных гиперпараметров: $\Theta=100$, $\gamma \in \{1, 10, 100\}$)

фициентом масштабирования γ в случае нелинейного интервала квантования. Разница в распределениях параметризованного угла наклона $\hat{\theta}$ при линейном и нелинейном интервалах квантования показана на рис. 4.

Для количественной оценки ошибки интерполяции необходимо выбрать метод, с помощью которого можно сравнить прямые линии.

В задачах компьютерного зрения широкое применение находят метрики CD (Chamfer distance) [15] и IoU (Intersection Over Union) [16]. Данные метрики работают на уровне пикселей обрабатываемого изображения. Метрика CD оценивает сходство между двумя наборами точек, а метрика IoU дает оценку отношения площадей детектируемых объектов.

Существует специализированная версия метрики IoU – mIoU [17], которая адаптирована для сравнения прямых линий на изображении. Такая метрика оценивает площадь пересечения двух сравниваемых прямых линий к общей площади изображения согласно формуле 8.

$$mIoU(l_1, l_2, I) = \frac{S(l_1 \cap l_2)}{S(I)}, \quad (8)$$

где mIoU – оценочная метрика, l_1 – первая прямая линия, l_2 – вторая прямая линия, I – изображение, S – функция расчета площади.

Особенностью метрики mIoU является ее диспропорция: для двух пересекающихся прямых линий, между которыми задан фиксированный угол наклона, метрика mIoU будет показывать разное значение, зависящее от конкретного места расположения прямых на изображении. Данная метрика удобна при относительном сравнении линий на растровых изображениях.

На рис. 5 показано сравнение двух прямых линий с помощью метрики mIoU. Угол между прямыми линиями фиксирован и составляет 10 градусов. Видно, что при изменении ориентирования прямых на изображении метрика mIoU имеет разное значение, напрямую зависящее от площади пересечения.

При обработке цифровых сигналов в контексте задач квантования, используется термин «шум квантования»

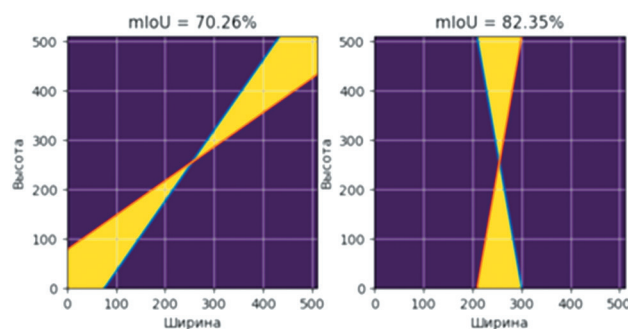


Рис. 5. Сравнение двух прямых линий с помощью метрики mIoU (площадь пересечения прямых показана желтым цветом)

[18], который представляет собой величину ошибки, возникающую в сигнале в результате процесса квантования. Эту ошибку можно использовать для оценки точности интерполяции, как абсолютную – без учета разрешения изображения, количества его пикселей на единицу площади. Расчет ошибки квантования производится по формуле (9)

$$e_i = \hat{x}_i - x_i, \quad (9)$$

где e_i – ошибка квантования, $\hat{x}$ – значение квантованного отсчета сигнала, x – истинное значение сигнала, i – номер отсчета.

Так как изменение параметра ρ влияет на смещение прямой линии относительно центра изображения, а интерполяция параметра $\hat{\rho}$ не приводит к пересечению искомой линии и детектируемой границы пути, то при оценке сходства прямых линий для данного параметра задано фиксированное значение, соответствующее центру изображения. А оценка точности интерполяции производится только для угла наклона линий θ по отношению к 1 градусу и представлена в процентах согласно формуле (10)

$$E_i = \frac{180 * e_i}{\pi} \cdot 100, \quad (10)$$

где E_i – нормированная ошибка квантования в процентах, e_i – ошибка квантования, i – номер отсчета.

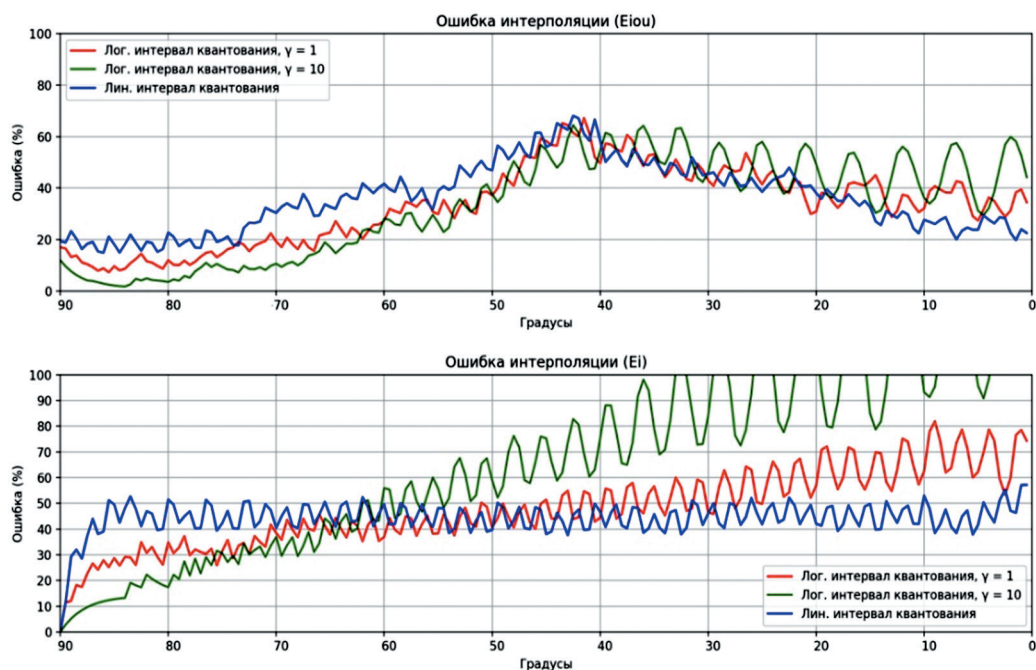


Рис. 6. Графики распределения ошибок интерполяции E_{iou} и E_i параметра $\hat{\theta}$ на интервале от 0 до 90 градусов (размерность исходного графического изображения 512×512 точек, шага угла 0,5, $\Theta=100$, $R=100$, $\gamma \in \{1, 10\}$)

Для сравнительного анализа точности интерполяции, значения ее ошибки, проведена адаптация метрики mIoU – нормирование, в соответствии с формулой (11)

$$E_{iou} = \left(1 - \frac{mIoU - \min(mIoU)}{\max(mIoU) - \min(mIoU)}\right) \cdot 100, \quad (11)$$

где E_{iou} – нормированная ошибка mIoU в процентах, mIoU – оценочная метрика.

На рис. 6 приведены графики распределения ошибок интерполяции E_{iou} и E_i параметра θ на интервале от 0 до 90 градусов. Следует отметить, что подбор гиперпараметров Θ и R параметрического пространства Хафа для анализа был произведен таким образом, чтобы размах абсолютного значения метрики mIoU был в рамках

одного процента для обоих рассматриваемых интервалов квантования угла θ . Выбранная размерность исходного графического изображения для метрики mIoU составила 512×512 точек.

Таким образом, при рассмотрении графиков распределения ошибок интерполяции для линейного и нелинейного интервалов квантования видно, что нелинейный интервал квантования позволяет получить более высокую точность определения прямых линий для заданной зоны интереса. В табл. 1 показана разница между ошибками интерполяции для рассматриваемых интервалов квантования.

Из представленной табл. 1 видно, что конфигурация зоны интереса может быть осуществлена с помощью

Табл. 1. Разница между ошибками интерполяции для рассматриваемых интервалов квантования

Угол (град.)	Линейный интервал квантования $E_i, \%$	Нелинейный интервал квантования			
		$\gamma=1$		$\gamma=10$	
		$E_i, \%$	ΔE_i	$E_i, \%$	ΔE_i
0	45,76	59,43	-29,87%	105,32	-130,16%
10	53,04	62,53	-17,89%	93,02	-75,72 %
20	42,08	56,88	-35,17%	113,93	-170,75%
30	46,12	46,05	-0,82%	84,00	-82,13%
40	46,71	44,37	5,01%	75,28	-61,16%
50	39,68	40,66	-2,47%	59,06	-48,84%
60	49,63	36,95	25,55%	55,94	-12,71%
65	45,23	37,83	16,36%	42,36	6,35%
70	40,44	38,47	4,87%	36,95	8,63%
75	42,25	31,45	25,56%	30,63	27,5%
80	51,05	34,84	32,35%	17,39	66,23%
85	49,54	28,71	42,05%	12,76	74,24%
89	29,28	12,06	58,81%	5,17	82,34%

параметра γ , который определяет коэффициент масштабирования для нелинейного интервала квантования. Увеличение коэффициента γ приводит к повышению разрешающей способности параметрического пространства для детектируемых прямых линий с углом наклона, близким к 90 градусам, и к уменьшению разрешающей способности при углах, близких к 180 градусам. Разница в ошибках интерполяции ΔE_i показана в процентном отношении между линейным и нелинейным интервалами квантования, где жирным шрифтом выделен прирост разрешающей способности для заданного коэффициента масштабирования γ .

Эксперимент на реальных данных

Для проведения эксперимента на реальных данных выбрана аппаратная платформа NVIDIA Jetson Nano исполнения B01 с общей вычислительной мощностью 0,5 терафлопс. Обучение предиктивных моделей производилось на видеокарте NVIDIA GeForce 1050Ti. В качестве обучающего набора данных использована видеозапись с регистратора смонтированного в кабине машиниста поезда. Для аннотации данных разработано специализированное программное обеспечение (рис. 7). Все изображения обучающего набора данных приведены к разрешению 1280×720 точек, устранены радиальная и тангенциальная дисторсии. Таким образом, для обучения предиктивных моделей подготовлено 10 000 изображений со следующим распределением: зима – 48%, лето – 52%. В рамках эксперимента выбраны изображения с прямым профилем пути.

В качестве классического метода семантической сегментации изображений для сравнительного анализа выбрана сверточная сеть UNet [8]. Входом модели сети является изображение размером 320×320 точек, а требуемый результат работы предиктивной модели – бинарная маска, где каждый пиксель изображения обозначен как принадлежащий или не принадлежащий к железнодорожному пути. Следовательно, модель сети UNet адаптирована к бинарной классификации и на выходе модели использована логистическая функция согласно формуле (12)

$$\delta(z) = \frac{1}{(1 + e^{-z})}, \quad (12)$$

где δ – вероятностная оценка, z – исходное значение каждого пикселя карты свойств.

Для предлагаемого в рамках работы метода разработана предиктивная модель сверточной сети с условным наименованием HoughNet. Входом модели сети является изображение с размерностью 320×320 точек. Модель HoughNet использует сверточные слои энкодера сети UNet для создания бинаризованных карт признаков исходного изображения. Для достижения инвариантности при определении искомых прямых линий, карты признаков берутся в трех масштабах: 160×160 , 80×80 , 40×40 . Далее каждая карта со своей размерностью

проходит через соответствующий слой сети «Hough», на котором реализуется преобразование Хафа и билинейная интерполяция карты к заданному дискретному параметрическому пространству Хафа: $\Theta=100$ и $R=100$. Результатом работы модели является конкатенация карт признаков, пропущенная через логистическую функцию (формула (12)) – предсказанный Хаф-образ.

Критерием ошибки при обучении обоих предиктивных моделей выбран результат работы функции потерь бинарной кросс-энтропии – формула (13)

$$loss = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i \log_2 P(y_i) + (1 - y_i) \log_2 (1 - P(y_i))), \quad (13)$$

где $loss$ – ошибка, y_i – принадлежность к одному из двух классов, $P(y_i)$ – вероятность для первого класса, $(1 - P(y_i))$ – вероятность для второго класса, N – число пикселей на изображении, $1/N$ – показатель равновероятного распределения классов для каждого пикселя изображения.

На рис. 8 показана структурная схема используемых предиктивных моделей.

Подготовлено 750 изображений для имитации видеоряда продолжительностью 0,5 минуты при 25 кадрах в секунду, которые содержат три железнодорожных пути с прямым профилем, где каждый путь размечен человеком для последующего сравнительного анализа и оценок. Для оценки работы предиктивных моделей выбрана метрика mIoU. Так как при семантической сегментации возможны разрывы в предсказанной бинарной маске, что связано с объектами на путях, то площадь такого разрыва будет просуммирована с площадью пересечения в рамках оценочной метрики mIoU для обоих прямых линий, характеризующих границу железнодорожного пути. По результатам проведения эксперимента составлена табл. 2, в рамках которой сведены данные по работе обеих рассматриваемых предиктивных моделей на аппаратной платформе NVIDIA Jetson Nano.

Табл. 2 отражает среднюю метрику mIoU для каждого из трех сегментированных путей на изображении, которые отсортированы в следующем порядке следования: «1-ый путь» – линии границы железнодорожного пути, чей угол наклона наиболее близок к 90 градусам, тогда

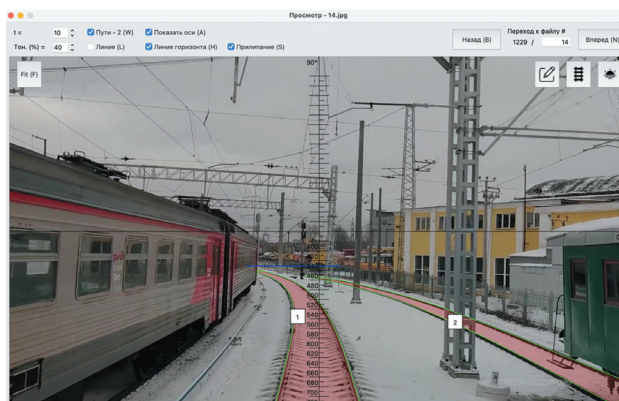


Рис. 7. Программное обеспечение для аннотации обучающего набора данных

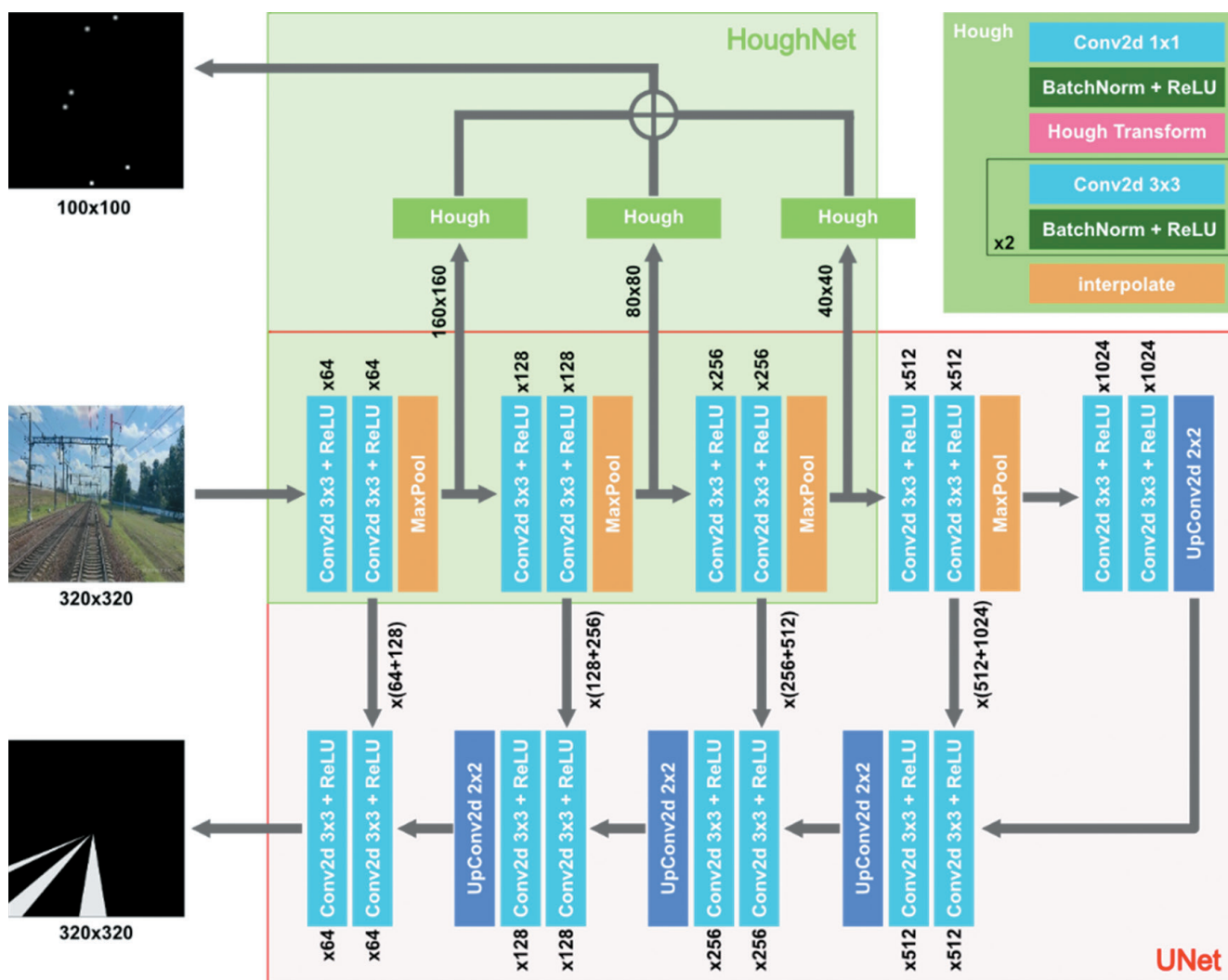


Рис. 8. Структурная схема используемых предиктивных моделей
(красным блоком выделена структура сверточной сети UNet, зеленым – сеть HoughNet)

как «3-ий путь» – линии с углом наклона, близким к 180 градусам. Графа «ошибки первого рода» отражает наличие ложноположительной ошибки предсказания, «ошибки второго рода» – наличие ложноотрицательного предсказания. Графа «FPS» отражает среднее число обрабатываемых предиктивной моделью изображений за одну секунду времени.

По результатам эксперимента было установлено, что использование предлагаемого метода в составе предиктивной модели сопоставимо по точности с классическим методом семантической сегментации изображений. Использование нелинейного интервала квантования параметрического пространства Хафа прогнозируемо повышает точность предсказания модели в рамках зоны интереса и, соответственно, понижает точность вне такой зоны. Разработанная для тестирования модель сети HoughNet обладает большей производительностью на 42% при одинаковых аппаратных ресурсах, однако стоит отметить наличие ошибок второго рода. Следовательно, при использовании более сложных классификаторов в модели для определения карты признаков, выигрыш в

производительности может быть ниже или полностью нивелирован.

К преимуществам предлагаемого метода следует отнести однозначное математическое определение прямой линии, благодаря чему появляются возможности экстраполяции на прямом профиле пути. Это обеспечивает устойчивость к определению границы пути при естественных атмосферных искажениях для устойчивых (туман, дым) и динамических (снег, дождь) погодных условий, а также в случаях, когда часть пути перекрыта каким-либо объектом.

Заключение

В рамках данной работы был предложен и рассмотрен альтернативный метод определения границ железнодорожных путей на изображении с помощью геометрических примитивов в виде прямых линий. Предложенный метод построен на вычислительном алгоритме преобразования Хафа.

Для уменьшения времени построения Хаф-образа анализируемого изображения было предложено два

Табл. 2. Результат работы предиктивных моделей

	mIoU (1-ый путь)	mIoU (2-ой путь)	mIoU (3-ий путь)	Ошибки первого рода	Ошибки второго рода	FPS
UNet	92,86%	93,10%	94,54%	–	–	~12
HoughNet (линейный) $\Theta=100, R=100$	95,31%	95%	97,40%	–	+	~17
HoughNet (нелинейный) $\Theta=100, R=100, \gamma=1$	95,53%	92,72%	89,33%	–	+	~17
HoughNet (нелинейный) $\Theta=100, R=100, \gamma=10$	98,01%	83,07%	72,10%	–	–	~17

варианта компоновки параметрического пространства в дискретной форме: линейное и нелинейное квантования. Предложенные варианты компоновки пространства учитывают характер работы предиктивной модели комплекса АПК ФИД, а также его физико-технические характеристики, в виде расположения и ориентирования видеокамер на железнодорожный станции. Введено понятие зоны интереса, которая определяется нелинейным распределением для угла наклона прямой линии, описывающей границу железнодорожного пути. В ходе исследования был произведен сравнительный анализ предложенных вариантов компоновки, в рамках которого были рассчитаны ошибки интерполяции.

Для оценки применимости метода к решаемой задаче, качества и скорости его работы в составе предиктивной модели была разработана сверточная сеть HoughNet. В результате был проведен сравнительный анализ разработанной сети с моделью семантической сегментации изображений UNet. Точность работы сети HoughNet оказалась сопоставимой с методом решения задачи с помощью семантической сегментации, однако использование нелинейного интервала квантования Хаф-образа позволило повысить точность прогнозирования в заданной зоне интереса. Модель сети HoughNet оказалась на 42% быстрее модели UNet.

Таким образом, предложенный метод представляет альтернативное решение для технической обеспечивающей задачи комплекса АПК ФИД по определению границ железнодорожного пути и может быть применен на вычислительном графе предиктивной модели комплекса АПК ФИД.

Библиографический список

1. LeCun Y., Boser B., Denker J.S. et al. Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition // *Neural Computation*. 1989. Vol. 1(4). Pp. 541-551.
2. Zhao H., Shi J., Qi X. et al. Pyramid scene parsing network // *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern Recognition (CVPR)*. 2017. Jun. Pp. 2881-2890.
3. He K., Zhang X., Ren S. et al. Deep residual learning for image recognition // *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern Recognition (CVPR)*. 2016. Jun. Pp. 770-778.
4. Chen L.-C., Zhu Y., Papandreou G. et al. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation // *European Conference on Computer Vision (ECCV)*. 2016. Sep. Pp. 833-851.
5. Chollet F. Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions // *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern Recognition (CVPR)*. 2017. Jun. Pp. 1251-1258.
6. Chen L.-C., Papandreou G., Kokkinos I. et al. Deeplab: Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets, Atrous Convolution, and Fully Connected CRFs // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2018. Vol. 40(4). Pp. 834-848.
7. Hernández D., Cecilia J.M., Cano J.C. et al. Flood detection using real-time image segmentation from unmanned aerial vehicles on edge-computing platform // *Remote Sensing*. 2022. Vol. 14(1). P. 223.
8. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation // *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI) 2015: 18th International Conference*. Munich: Springer International Publishing, 2015. Pp. 234-241.
9. Hough P.V. Method and means for recognizing complex patterns. US Patent No. 3,069,654 (1962).
10. Brady M.L., Yong W. Fast Parallel Discrete Approximation Algorithms for the Radon Transform // *Proceedings of the fourth annual ACM symposium on Parallel algorithms and architectures (SPAA)*. 1992. Pp. 91-99.
11. Canny J. A computational approach to edge detection // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1986. Vol. 8. Pp. 679-698.
12. Sobel I. History and Definition of the Sobel Operator. 2014. URL: https://www.researchgate.net/publication/239398674_An_Isotropic_3x3_Image_Gradient_Operator (дата обращения: 24.06.2024).
13. Bradley D., Roth G. Adaptive thresholding using the integral image // *Journal of graphics tools*. 2007. Vol. 12(2). Pp. 13-21.
14. Cheng C., Kalloor J. Analysis of High Level implementations for Recursive Methods on GPUs. URL: https://people.eecs.berkeley.edu/~kubitrn/courses/cs262a-F21/projects/reports/project16_report_ver3.pdf (дата обращения: 24.06.2024).
15. Borgefors G. Distance transformations in digital images // *Computer vision, graphics, and image processing*. 1986. Vol. 34(3). Pp. 344-371.

16. Murphy A.H. The Finley Affair: A Signal Event in the History of Forecast Verification // *Weather and Forecasting*. 1996. Vol. 11(1). Pp. 3-20.

17. Lee J.-T., Kim H.-U., Lee C. et al. Semantic line detection and its applications // *The International Conference on Computer Vision (ICCV)*. 2017. Pp. 3229-3237.

18. Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д. Цифровая обработка сигналов. М.: Радио и связь, 1985. 312 с.

References

1. LeCun Y., Boser B., Denker J.S. et al. Backpropagation Applied to Handwritten Zip Code Recognition. *Neural Computation* 1989;1(4):541-551.

2. Zhao H., Shi J., Qi X. et al. Pyramid scene parsing network. In: *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (CVPR)*; 2017. Pp. 2881-2890.

3. He K., Zhang X., Ren S. et al. Deep residual learning for image recognition. In: *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (CVPR)*; 2016. Pp. 770-778.

4. Chen L.-C., Zhu Y., Papandreou G. et al. Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation. In: *European Conference on Computer Vision (ECCV)*; 2016. Pp. 833-851.

5. Chollet F. Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions. In: *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern Recognition (CVPR)*; 2017. Pp. 1251-1258.

6. Chen L.-C., Papandreou G., Kokkinos I. et al. Deeplab: Semantic Image Segmentation with Deep Convolutional Nets, Atrous Convolution, and Fully Connected CRFs. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 2018;40(4):834-848.

7. Hernández D., Cecilia J.M., Cano J.C. et al. Flood detection using real-time image segmentation from unmanned aerial vehicles on edge-computing platform. *Remote Sensing* 2022;14(1):223.

8. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In: *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI) 2015: 18th International Conference*. Munich: Springer International Publishing; 2015. Pp. 234-241.

9. Hough P.V. Method and means for recognizing complex patterns. US Patent No. 3,069,654 (1962).

10. Brady M.L., Yong W. Fast Parallel Discrete Approximation Algorithms for the Radon Transform. In: *Proceedings of the fourth annual ACM symposium on Parallel algorithms and architectures (SPAA)*; 1992. Pp. 91-99.

11. Canny J. A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 1986;8:679-698.

12. Sobel I. History and Definition of the Sobel Operator. (accessed 24.06.2024). Available at: [https://](https://www.researchgate.net/publication/239398674_An_Isotropic_3x3_Image_Gradient_Operator)

www.researchgate.net/publication/239398674_An_Isotropic_3x3_Image_Gradient_Operator.

13. Bradley D., Roth G. Adaptive thresholding using the integral image. *Journal of graphics tools* 2007;12(2):13-21.

14. Cheng C., Kalloor J. Analysis of High Level implementations for Recursive Methods on GPUs. (accessed 24.06.2024). Available at: https://people.eecs.berkeley.edu/~kubitron/courses/cs262a-F21/projects/reports/project16_report_ver3.pdf.

15. Borgefors G. Distance transformations in digital images. *Computer vision, graphics, and image processing* 1986;34(3):344-371.

16. Murphy A.H. The Finley Affair: A Signal Event in the History of Forecast Verification. *Weather and Forecasting* 1996;11(1):3-20.

17. Lee J.-T., Kim H.-U., Lee C. et al. Semantic line detection and its applications. In: *The International Conference on Computer Vision (ICCV)*; 2017. Pp. 3229-3237.

18. Goldenberg L.M., Matyushkin B.D. [Digital signal processing]. Moscow: Radio i svyaz; 1985. (in Russ.)

Сведения об авторе

Полевский Илья Сергеевич – главный эксперт, Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), Нижегородская улица, дом 27, строение 1, г. Москва, Российская Федерация, 109029, e-mail: i.polevskiy@vniias.ru

About the author

Iliia S. Polevskiy, Chief Expert, Joint Stock Company Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation (JSC NIIAS), 27, bldg 1 Nizhegorodskaya St., Moscow, 109029, Russian Federation, e-mail: i.polevskiy@vniias.ru.

Вклад автора в статью

Полевский И.С. выполнил обзор библиографических источников, осуществил постановку и формализацию задачи, выполнил разработку метода определения границы железнодорожного пути; ввел определение зоны интереса и предложил варианты дискретизации параметрического пространства предложенного метода, а также привел для них численные оценки качества работы; разработал программное обеспечение аннотации данных и оценочную предиктивную модель; выполнил постановку эксперимента и провел сравнительный анализ результатов.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

О функции надежности системы $\langle GI_{k \leq n} | GI | I \rangle$. Часть I. Аналитические результаты

On the dependability function of the $\langle GI_{k \leq n} | GI | I \rangle$ system. Part I. Analytical results

Рыков В.В.¹, Иванова Н.М.^{2*}

Rykov V.V.¹, Ivanova N.M.^{2*}

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

²Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

¹National University of Oil and Gas (Gubkin University)

²V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences

*nm_ivanova@bk.ru



Рыков В.В.



Иванова Н.М.

Резюме. Целью статьи является исследование основных характеристик надежности восстанавливаемых систем k -из- n с произвольными распределениями времени безотказной работы и ремонта их компонентов, а также общим числом ремонтных единиц. Система k -из- n представляет собой систему, состоящую из n компонентов, которая отказывает при отказе ее k ($k \leq n$) компонентов. Для восстановления отказавших компонентов имеется I ремонтных устройств. Такая система обозначается как $\langle GI_{k \leq n} | GI | I \rangle$. Для исследования привлекаются методы маркированных марковских процессов и теории порядковых статистик. С использованием предложенного подхода построена математическая модель системы, приведены преобразования меток и аналитические выражения для вычисления их распределений. В следующей части статьи на основе предлагаемого метода сформулирован алгоритм имитационного моделирования для оценки основных характеристик надежности. Он не только позволит провести численное исследование таких систем, но и послужит инструментом анализа чувствительности характеристик надежности к исходным параметрам системы.

Abstract. The paper aims to study the primary dependability characteristics of restorable k -out-of- n systems with arbitrary distributions of failure-free time and time to component repair, as well as the total number of repair units. A k -out-of- n system is a system consisting of n components that fails when k out of its ($k \leq n$) components fail. I repair devices are available for restoring failed components. Such a system is denoted as $\langle GI_{k \leq n} | GI | I \rangle$. The research employed marked Markov processes and the theory of order statistics. Using the proposed approach, a mathematical system model was constructed, marks transformations were mapped and analytic expressions for calculating their distributions were given. In the following part of the paper, using the proposed method, a simulation algorithm will be defined for the purpose of assessing the key dependability characteristics. It will not only enable a numerical study of such systems, but will also help analyse the sensitivity of the dependability characteristics to the initial system parameters.

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

Keywords: marked Markov process, $\langle GI_{k \leq n} | GI | I \rangle$ system, arbitrary distributions of fault-free operation and repair times, sensitivity analysis.

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

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

Поступила: 07.05.2024 / **После доработки:** 08.07.2024 / **К печати:** 09.09.2024

Received on: 07.05.2024 / **Revised on:** 08.07.2024 / **For printing:** 09.09.2024

Введение

Со времени А.А. Маркова (старшего, 1856 – 1922) основным объектом изучения стохастических процессов как в непрерывном, так и дискретном времени, стали марковские процессы, обобщение и развитие которых продолжается до наших дней. Неоспоримый вклад в развитие теории марковских процессов, как и вообще теории случайных процессов, внес А.Н. Колмогоров (1903 – 1987).

Широкое развитие и применение получили такие обобщения марковских процессов, как полумарковские, регенерирующие, полурегенерирующие и др. процессы (см. в частности [1]). В последующие годы для исследования стохастических процессов с дискретным временем, зависящих от некоторого набора событий, использовалось понятие обобщенного полумарковского процесса. В работе [2] эта модель была использована для исследования стохастических явлений, дискретно изменяющихся во времени и зависящих от дискретных событий. Было показано, что многие модели теории массового обслуживания (ТМО), теории надежности и стохастических сетей могут быть описаны в рамках этих моделей. В последующем для обобщенных полумарковских процессов, опираясь на их регенеративную структуру, были доказаны законы больших чисел и функциональные предельные теоремы [3], [4].

Классические результаты (для процессов с конечным множеством состояний) в этом направлении известны давно, и новые результаты в этом направлении связаны в основном с исследованием условий, допускающих использование регенеративной структуры изучаемых моделей при расширении пространства их состояний. Заметим, однако, что несмотря на многочисленные примеры возможного применения предложенной модели конкретных исследований систем обслуживания или надежности в этих работах не приведено.

В ряде наших работ для исследования сложных стохастических моделей также использовались идеи регенерации, при этом понятие регенерации обобщалось в сторону построения вложенных и разложимых полурегенерирующих процессов, что открывало возможности реального исследования конкретных систем надежности. Так, в работах [5], [6] с помощью разложимых полурегенерирующих процессов была рассмотрена модель системы холодного дублирования с произвольными распределениями времени безотказной работы и ремонта ее компонентов.

Этот метод оказался не применим для исследования аналогичной системы горячего дублирования и других более сложных моделей. Для исследования аналогичной системы горячего дублирования в [7] было введено понятие маркированного марковского процесса (ММП), который оказался весьма плодотворным. В настоящей работе этот метод используется

для исследования системы k -из- n с произвольным числом ремонтирующих устройств и произвольными распределениями времени безотказной работы (в.б.р.) и ремонта ее компонентов. При этом основное внимание уделяется разработке методов и процедур вычисления основных характеристик модели и исследованию ее свойств, таких как чувствительность ее характеристик к виду исходных распределений их параметров.

Статья организована следующим образом. В следующем разделе представлена постановка задачи и собраны основные обозначения и предположения, а также приведены необходимые предварительные сведения. Затем в разделе 2 приводятся построение математической модели системы в терминах ММП и преобразования меток, а также вычисляются их переходные вероятности. В разделе 3 приводятся аналитические выражения для распределения меток. Наконец, в разделе 4 приводятся выражения для вычисления функции надежности модели в терминах меток. Статья заканчивается заключением, где приведены некоторые идеи возможного дальнейшего развития предложенного подхода.

1. Постановка задачи. ММП

1.1. Описание системы. Основные обозначения и предположения

Рассмотрим восстанавливаемую систему k -из- n с произвольными распределениями в.б.р. и ремонта ее элементов и произвольным числом ремонтирующих устройств, для которой будем использовать обозначение $\langle GI_{k \leq n} | GI | L \rangle$ ($L < k$). Обозначим через

- $A_i : (i = 1, 2, \dots)$ в.б.р. элементов системы, которые предполагаются независимыми одинаково распределенными (н.о.р.) случайными величинами (с.в.) и через $A(t) = P\{A_i \leq t\}$ их общую по предположению абсолютно непрерывную функцию распределения (ф.р.) с плотностью распределения (п.р.) $a(t) = A'(t)$ и математическим ожиданием $a = E[A_i]$;
- $B_i : (i = 1, 2, \dots)$ длительности ремонтов элементов системы, которые предполагаются н.о.р. с.в. с общей для них абсолютно непрерывной ф.р. $B(t) = P\{B_i \leq t\}$, п.р. $b(t) = B'(t)$ и математическим ожиданием $b = E[B_i]$.

В дальнейшем, как правило, с.в. обозначаются главными латинскими буквами $X, Y, \dots$, а их значения – малыми $x, y, \dots$ (исключения составляют упомянутые выше распределения и математические ожидания исходных с.в.), при этом многомерные (векторные) с.в. и их значения обозначаются соответствующими полужирными буквами.

Для исследования этой модели используются понятия ММП и теории порядковых статистик. В следующих разделах приводятся необходимые о них сведения.

1.2. ММП

Под ММП понимается процесс с дискретным параметром $t=0,1,\dots$

$$Z(t) = (J(t), \mathbf{X}(t)), t = 0, 1, \dots,$$

первая компонента которого представляет собой марковскую цепь $J(t)$ с не более, чем счетным пространством состояний $\mathcal{J}$, а вторая – набор случайных меток $\mathbf{X}(t) = \{\mathbf{X}_j(t) : j \in \mathcal{J}\}$, каждая из которых может представлять собой вектор, компоненты которого принимают значения в измеримых пространствах меток $(E_j, \mathcal{E}_j)$. Такой процесс задается:

- переходными вероятностями $p_{ij}(\mathbf{X}_i)$ марковской цепи J , зависящими от содержания метки $\mathbf{X}_i$ в основном состоянии i на шаге (в момент времени) t ;
- операторами преобразования меток $\Phi_{ij}(\mathbf{X}_i)$ при переходе из состояния i в состояние j , зависящими от содержания $\mathbf{X}_i$ метки в состоянии i и значения некоторой с.в. ξ_i в момент времени t из последовательности н.о.р. с.в. ξ_i ($t = 1, 2, \dots$) и их распределениями.

Естественно, для полного описания такого процесса необходимо задать начальное распределение $\alpha = (\alpha_j : j \in \mathcal{J})$ основной марковской цепи $J(t)$, начальное распределение $\mu(0, \cdot) = \{\mu_j(0, \cdot) : j \in \mathcal{J}, \cdot \in \prod_j \mathcal{E}_j\}$ меток $\mathbf{X}$ и распределение $F(\cdot)$ с.в. ξ_i .

На основе такой модели можно исследовать широкий класс прикладных моделей теории надежности, теории массового обслуживания, стохастических сетей и др.

1.3. Вспомогательные сведения и преобразования

Далее нам потребуются некоторые сведения из теории вариационных рядов (порядковых статистик). Обозначим через

$$X^{(1)} \leq X^{(2)} \leq \dots \leq X^{(i)} \leq \dots \leq X^{(n)}$$

вариационный ряд для независимой выборки с.в. X_i ($i = 1, n$). Здесь для сохранения в дальнейшем единства обозначений для членов вариационного ряда вместо традиционных нижних индексов в скобках использованы верхние индексы. Соответствующие значения с.в. также будем обозначать верхними индексами, только без скобок. Известно (см. [8]), что совместная п.р. элементов вариационного ряда $X^{(i)}$ из выборки $\mathbf{X}_i$ независимых с.в. с п.р. $f(x)$ имеет вид

$$f(x^1, \dots, x^n) = n! \prod f(x^i) \text{ в области } x^1 \leq \dots \leq x^i \leq \dots \leq x^n. \quad (1)$$

Определим операции уменьшения и сдвига $Sh[\mathbf{X}_n, X]$ вариационного ряда $\mathbf{X}_n$ на величину $X \leq X^{(1)}$ и пополнения $Ad[\mathbf{X}_n, X]$ вариационного ряда величиной X . Операция уменьшения членов вариационного ряда определяются соотношениями

$$X^{(i)}(Sh[\mathbf{X}_n, X]) = X^{(i)} - X, \text{ при } i = \overline{1, n}, \quad (2)$$

и для $X=X^{(1)}$ превращается в операцию сдвига, так как при этом первая компонента нового вектора обнуляется и удаляется. Операция пополнения вариационного ряда независимой от его членов величиной X задается для них соотношением

$$X^{(i)}(Ad[\mathbf{X}_n, X]) = \begin{cases} X^{(i)} & \text{для } i < r, \\ X & \text{для } i = r, \\ X^{(i+1)} & \text{для } i > r, \end{cases} \quad (3)$$

где $r = \max\{i : X^{(i)} \leq X\}$. Аналогичными соотношениями распространим действие этих операторов на значения x_n векторов $\mathbf{X}_n$ и с.в. X ,

$$x^i(Sh[\mathbf{x}_n, x]) = x^i - x, \text{ при } i = \overline{1, n},$$

$$x^i(Ad[\mathbf{x}_n, x]) = \begin{cases} x^i & \text{для } i < r, \\ x & \text{для } i = r, \\ x^{i+1} & \text{для } i > r, \end{cases}$$

Для п.р. сдвинутого и пополненного векторов справедлива лемма.

Лемма 1. Предположим, что п.р. $f(x^1, \dots, x^n)$ исходного вектора непрерывна по всем переменным. Тогда п.р. f_{Sh} сдвинутого упорядоченного вектора $\mathbf{X}_n$ на независимую от него с.в. X с ф.р. G и п.р. g , удовлетворяющую условию $P\{X \leq X^{(1)}\} = 1$, определяется соотношением

$$f_{Sh}(x^1, \dots, x^n) = \int_0^{x^1} f(x^1 + u, \dots, x^n + u) g(u) du; \quad (4)$$

в частности, при $X=X^{(1)}$ справедливо соотношение

$$f_{Sh}(x^2, \dots, x^n) = \int_0^{x^2} f(x^1, x^2 + x^1, \dots, x^n + x^1) dx^1; \quad (5)$$

п.р. f_{Ad} дополненного упорядоченного вектора $Ad[\mathbf{X}_n, X]$ независимой от него с.в. X с ф.р. G и п.р. g имеет вид

$$f_{Ad}(x^1, \dots, x^{n+1}) = \sum_{1 \leq i \leq n+1} (G(x^i) - G(x^{i-1})) g(x^i) f(x^1, \dots, x^{i-1}, x^{i+1}, \dots, x^{n+1}), \quad (6)$$

где $x^0 = 0, x^{n+2} = \infty$.

Доказательство. Действительно, так как преобразование сдвига является невырожденным линейным преобразованием с детерминантом, равным единице, то формулы (4), (5) следуют из общих формул вычисления п.р. преобразованных с.в. Обозначим ф.р. с.в. $\mathbf{X}_{Sh} = \mathbf{X} - X$ через F_{Sh} , и пусть g п.р. с.в. X . Запишем ф.р.

$$F_{Sh}(\mathbf{x}) = P\{\mathbf{X}_n \leq \mathbf{x} + x\} = \int_0^{x_1} P\{\mathbf{X} \leq \mathbf{x} + u\} g(u) du.$$

Дифференцируя ф.р. F_{Sh} слева n раз по всем переменным и справа под знаком интеграла, получим формулу (4) в виде

$$f_{Sh}(\mathbf{x}) = \int_0^{x_1} f(x+u)g(u)du = \\ \int_0^{x^1} f(x^1+u, \dots, x^n+u)g(u)du.$$

Если $X=X^{(1)}$, то с.в. $\mathbf{X}_{Sh}$ превращается в вектор $(X^{(2)}-X^{(1)}, \dots, X^{(n)}-X^{(1)})$, а размерность ее ф.р. убывает на 1. Так как совместная п.р. вектора $\mathbf{X}$ равна $f(x^1, \dots, x^n)$, то представляя ее в терминах вероятностей, имеем

$$f_{Sh}(x^2, \dots, x^n)dx^2, \dots, dx^n = \\ \int_0^{x^2} P\{X^{(1)} \in dx^1, X^{(2)}-X^{(1)} \in dx^2, \dots, X^{(n)}-X^{(1)} \in dx^n\} = \\ = \int_0^{x^2} f(x^1, x^1+x^2, \dots, x^n+x^1)dx^1 dx^2 \dots dx^n,$$

откуда следует соотношение (5).

Далее, при пополнении упорядоченного вектора $\mathbf{X}_n$ с.в. X (с ф.р. $G(x)$ и п.р. g) эта с.в. может занять любую позицию $X^{(i)}$ между значениями x^{i-1} и x^i с вероятностью $G(x^i)-G(x^{i-1})$ и принять значение x^i с вероятностью $g(x^i)dx^i$. Поэтому представляя плотности распределения с помощью вероятностей, имеем

$$f_{Ad}(x^1, \dots, x^{n+1})dx^1 \dots dx^{n+1} = P\{X^i \in dx^i (i = \overline{1, n+1})\} = \\ = \sum_{1 \leq i \leq n+1} P\{x^{i-1} < X \leq x^i\} P\{X \in dx^i\} P\{X^{(j)} \in dx^j j \neq i\} = \\ = \sum_{1 \leq i \leq n+1} (G(x^i) - G(x^{i-1}))g(x^i) \cdot \\ \cdot f(x^1, \dots, x^{i-1}, x^{i+1}, \dots, x^{n+1})dx^1 \dots dx^{n+1},$$

что доказывает соотношение (6) и завершает доказательство леммы.

1.4. Постановка задачи

С помощью предложенного подхода можно исследовать различные стационарные и нестационарные характеристики модели, такие как:

- время до первого отказа системы R_0 , его распределение $F_{R_0}(t) = P\{R_0 \leq t\}$ и его среднее значение $\mu_{R_0} = E[R_0]$, или функцию надежности $R_0(t) = P\{R_0 > t\}$;
- для восстанавливаемой системы время между отказами R , его распределение $F_R(t) = P\{R \leq t\}$ и его среднее значение $\mu_R = E[R]$, или функцию надежности между отказами $R(t) = P\{R > t\}$;
- для восстанавливаемой системы – стационарные вероятности состояний системы $\pi_j = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{J(t) = j\}$ и стационарные вероятности безотказной работы – коэффициент готовности $K_{\text{гот}}$.

Однако при исследовании стационарного режима работы системы возможны различные процедуры восстановления системы: частичный или полный ремонт, что потребует дополнительного преобразования меток и,

соответственно, их дополнительного алгоритмического исследования. Поэтому в данной работе мы ограничимся исследованием поведения системы до первого отказа и ее функции надежности.

Далее предлагается построение ММП для рассматриваемой модели $\langle GI_{k \leq n} | GI | L \rangle$.

2. Построение математической модели системы $\langle GI_{k \leq n} | GI | I \rangle$ и преобразование меток

2.1. Построение математической модели системы $\langle GI_{k \leq n} | GI | I \rangle$ на основе ММП

В качестве математической модели системы $\langle GI_{k \leq n} | GI | I \rangle$ выберем последовательность

$$Z(t) = \{J(t), V(t), t = 0, 1, \dots\} \quad (7)$$

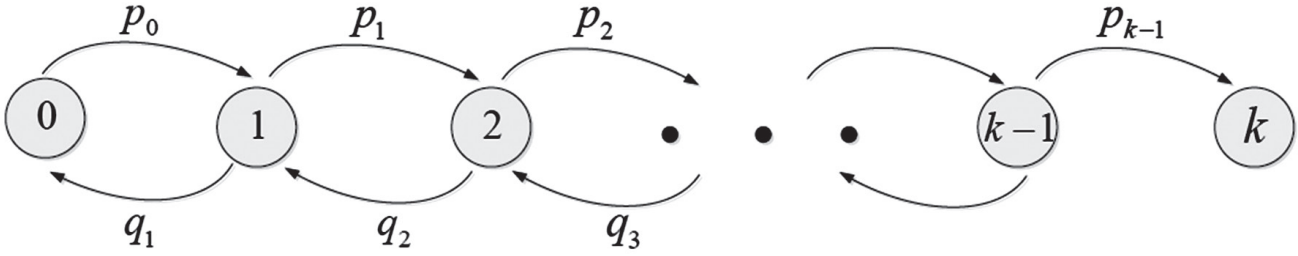
по моментам $S(t) t = 0, 1, \dots$ изменения состояний системы, которая, как будет показано позже, образует ММП. Здесь $J(t)$ – последовательность состояний системы с множеством состояний $\mathcal{J} = (0, 1, 2, \dots, k)$, где состояние j означает число компонентов системы, находящихся в состоянии отказа. В качестве меток $\mathbf{V}_j(t) = (\mathbf{X}_j(t), \mathbf{Y}_j(t))$ процесса в состоянии j на шаге t выберем набор остаточных в.б.р. $\mathbf{X}_j(t) = (X_j^{(1)}(t), \dots, X_j^{(n-j)}(t))$ элементов системы и набор их остаточных длительностей ремонта $\mathbf{Y}_j(t) = (Y_j^{(1)}(t), \dots, Y_j^{(j \wedge l)}(t))$, расположенных в порядке возрастания. Здесь верхний индекс указывает порядковый номер метки, нижний – номер состояния системы, переменная в скобках – это номер шага. Моменты $S(t) t = 0, 1, \dots$ изменения состояний системы определяются соотношениями

$$S(t) = S(t-1) + T_{J(t)}(t), t = 0, 1, \dots, S_0 = 0, \quad (8)$$

где интервал между моментами изменения состояний $T(t)$ для текущего состояния $J(t)$ определяется соотношением

$$T_{J(t)}(t) = \min [X_{J(t)}^{(1)}(t), Y_{J(t)}^{(1)}(t)]. \quad (9)$$

Заметим, что так как на любом шаге t величина $\mathbf{Y}_0(t) = Y_0^{(0)}(t)$ в состоянии $J(t)=0$ не определена, ее следует доопределить, положив $Y_0^{(0)}(t) = \infty$. Если в качестве начального состояния системы на шаге $t=0$ выбрать состояние, при котором все элементы системы исправны, $J(0)=0$, то метки имеют вид $X_0^{(i)}(0) = A^{(i)}$, $(i = \overline{1, n})$, $Y_0^{(0)}(0) = \infty$, где набор с.в. $A^{(i)}$ представляет собой компоненты вариационного ряда для выборки n н.о.р. с.в. $A_i \in A(\cdot)$ – в.б.р. компонентов системы. В последующем процесс оказывается в состоянии $j=0$ с некоторым набором меток, содержание и распределение которых будет вычислено позже.


 Рис. 1. Граф переходов последовательности $J(t)$

Возможные переходы основной последовательности $J(t)$, описывающей поведение рассматриваемой системы, работающей до первого отказа (с поглощением в состоянии k), представлены на графе переходов (рис. 1), который выглядит как типичный граф переходов процесса гибели и размножения.

Вероятности переходов основной марковской цепи явно не зависят от номера шага, то есть последовательность $J(t)$ является однородной, и вычисляются в зависимости от содержания меток по формулам

$$p_j = P\{J(t+1) = j+1 | J(t) = j\} = P\{X_j^{(l)}(t) \leq Y_j^{(l)}(t)\},$$

$$q_j = P\{J(t+1) = j-1 | J(t) = j\} = P\{X_j^{(l)}(t) > Y_j^{(l)}(t)\}.$$

В дальнейшем обозначим для простоты через Φ_j и Ψ_j операторы преобразования меток процесса Z при переходе из состояния j в состояния $j+1$ и $j-1$ соответственно, при этом так как операторы (как и вероятности переходов) от номера шага явно не зависят, то переменную t в этих обозначениях будем опускать

$$\mathbf{V}_{j+1} = \Phi_{j,j+1}[\mathbf{V}_j] \equiv \Phi_j[\mathbf{V}_j], \quad \mathbf{V}_{j-1} = \Phi_{j,j-1}[\mathbf{V}_j] \equiv \Psi_j[\mathbf{V}_j].$$

При описании работы этих операторов будем пользоваться операторами сдвига Sh и пополнения Ad для с.в. и их значений, определенными ранее соотношениями (2), (3).

При переходе вверх оператор Φ_j работает как сдвиг на величину $X_j^{(l)}$ для обеих компонент метки $\mathbf{V}_j$: $\Phi_j[\mathbf{V}_j] = Sh[\mathbf{V}_j, X_j^{(l)}]$ с последующим пополнением компоненты $\mathbf{Y}_j$ с помощью с.в. B : $\Phi_j[\mathbf{Y}_j] = Ad[Sh[\mathbf{Y}_j, X_j^{(l)}], B]$. При переходе вниз, наоборот, оператор Ψ_j работает как сдвиг на величину $Y_j^{(l)}$ для обеих компонент метки $\mathbf{V}_j$: $\Psi_j[\mathbf{V}_j] = Sh[\mathbf{V}_j, Y_j^{(l)}]$ с последующим пополнением сдвинутой компоненты X_j с помощью с.в. A : $\Psi_j[\mathbf{X}_j] = Ad[Sh[\mathbf{X}_j, Y_j^{(l)}], A]$. Опишем подробнее эти преобразования.

2.2. Преобразование меток

Рассмотрим поведение системы до ее первого отказа, то есть поведение процесса Z до момента первого попадания (поглощения) в состояние k . С помощью операторов сдвига и пополнения преобразования меток для

поглощающего в состоянии k процесса Z в терминах их компонент представлены в следующей теореме.

Теорема 1. При переходе из состояния j в состояние $j+1 \leq k$, то есть при отказе очередного элемента, метка $\mathbf{X}_j$ преобразуются следующим образом:

$$\begin{aligned} X_{j+1}^{(i)}(t+1) &= \Phi_j[\mathbf{X}_j(t)] = Sh[\mathbf{X}_j(t), X_j^{(l)}] = \\ &= X_j^{(i+1)}(t) - X_j^{(l)}(t) \quad (i = \overline{1, n-j-1}); \end{aligned} \quad (10)$$

а преобразование метки $\mathbf{Y}_j$ зависит от состояния системы и при $j < l$ для всех $i = \overline{1, j} \wedge l$ имеет вид

$$\begin{aligned} Y_{j+1}^{(i)}(t+1) &= \Phi_j[\mathbf{Y}_j(t)] = Ad[Sh[\mathbf{Y}_j(t), X_j^{(l)}(t)], B_{t+1}] = \\ &= \begin{cases} Y_j^{(i)}(t) - X_j^{(l)}(t) & \text{при } i < r, \\ B_{t+1} & \text{при } i = r, \\ Y_j^{(i+1)}(t) - X_j^{(l)}(t) & \text{при } i > r, \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

где $r = \max\{i: Y_j^{(i)}(t) - X_j^{(l)}(t) \leq B_{t+1}\}$; а при $l \leq j \leq k$ равно

$$\begin{aligned} Y_{j+1}^{(i)}(t+1) &= \Phi_j[\mathbf{Y}_j(t)] = Sh[\mathbf{Y}_j(t), X_j^{(l)}(t)] = \\ &= Y_j^{(i+1)}(t) - X_j^{(l)}(t) \quad (i = \overline{1, n-j-1}). \end{aligned} \quad (12)$$

Аналогично, при переходе из состояния $j \geq 1$ в состояние $j-1$ при $X_j^{(l)}(t) > Y_j^{(l)}(t)$, то есть при восстановлении одного из элементов системы, компоненты $X_{j-1}^{(i)}$ метки $\mathbf{X}_{j-1}$ преобразуются следующим образом:

$$\begin{aligned} X_{j-1}^{(i)}(t+1) &= \Psi_j[\mathbf{X}_j(t)] = Sh[\mathbf{X}_j(t), Y_j^{(l)}] = \\ &= X_j^{(i)}(t) - Y_j^{(l)}(t) \quad (i = \overline{1, n-j}), \end{aligned} \quad (13)$$

преобразование метки $\mathbf{Y}_j$ при переходе из состояния j в состояние $j-1$ зависит от исходного состояния и имеет вид: при $j \leq l$

$$\begin{aligned} Y_{j-1}^{(i)}(t+1) &= \Psi_j[\mathbf{Y}_j(t)] = Sh[\mathbf{Y}_j(t), Y_j^{(l)}(t)] = \\ &= Y_j^{(i+1)}(t) - Y_j^{(l)}(t) \quad (i = \overline{1, j}); \end{aligned} \quad (14)$$

при $l < j \leq k$

$$\begin{aligned}
Y_{j-1}^{(i)}(t+1) &= \Psi_j[Y_j(t)] = \\
&= Ad[Sh[Y_j(t), Y_j^{(i)}], B_{t+1}] = \\
&= \begin{cases} Y_j^{(i)}(t) - Y_j^{(i)}(t) & \text{при } i < r, \\ B_{t+1} & \text{при } i = r, \\ Y_j^{(i+1)}(t) - Y_j^{(i)}(t) & \text{при } i > r, \end{cases} \quad (15)
\end{aligned}$$

$$\exists de r = \max \{i : Y_j^{(i)}(t) - Y_j^{(i)}(t) \leq B_{t+1}\}.$$

Доказательство. Действительно, переход из состояния j в состояние $j+1$ на шаге t происходит при отказе одного из элементов системы с вероятностью p_j . При этом компоненты метки $\mathbf{X}_j$ сдвигаются на величину $X_j^{(i)}$ минимальной остаточной длительности жизни элементов системы в этом состоянии, что доказывает формулу (10). Аналогично остаточные длительности ремонта $Y_j^{(i)}$ уменьшаются на величину $X_j^{(i)}$, то есть метки сдвигаются на эту величину. Кроме того, при наличии свободных ремонтирующих устройств, то есть при $j < l$, в компоненты $Y_j^{(i)}$ метки $\mathbf{Y}_j$ добавляется новая компонента, соответствующая длительности B_{t+1} ремонта вновь отказавшей компоненты, что доказывает формулу (11). Если же все ремонтирующие устройства заняты, то есть при $l \leq j \leq k$, вновь отказавшая компонента становится в очередь и компоненты $Y_j^{(i)}$ метки $\mathbf{Y}_j$ просто сдвигаются на величину $X_j^{(i)}$, что доказывает формулу (12).

Аналогично, переход из состояния j в состояние $j-1$ на шаге t возможен только при $j \geq 1$ и происходит при восстановлении одного из отремонтированных элементов системы с вероятностью q_j . При этом остаточные длительности жизни элементов системы уменьшаются на величину $Y_j^{(i)}$, то есть компоненты метки $\mathbf{X}_j$ сдвигаются на величину $Y_j^{(i)}$. Кроме того, в метку $\mathbf{X}_j$ добавляется новая компонента, соответствующая длительности жизни A_{t+1} вновь отремонтированной компоненты системы, что доказывает формулу (13).

Наконец, преобразование метки $\mathbf{Y}_j$ при переходе из состояния j в состояние $j-1$ зависит от наличия ожидающих ремонта элементов системы, то есть от ее состояния. При $j \leq l$ компоненты вектора $\mathbf{Y}_j$ просто сдвигаются на величину $Y_j^{(i)}$, что доказывает формулу (14). Однако при наличии ожидающих ремонта элементов системы один из них поступает на ремонт и компоненты вектора дополняются в соответствии с формулой (15). Таким образом все формулы (11)–(15) доказаны, что завершает доказательство теоремы.

В этих выражениях с.в. A_{t+1} и B_{t+1} являются независимыми от прошлого $F_t = \sigma\{Z(s) : s \leq t\}$ процесса Z . Таким образом, полученные выражения показывают, что последовательность меток вычисляется рекуррентно с помощью независимых от прошлого процесса $Z(t)$ с.в., то есть набор меток образует в пространстве меток марковскую цепь специального вида.

2.3. Вычисление переходных вероятностей преобразования меток

Опираясь на полученные преобразования меток $\mathbf{V}_j = (\mathbf{X}_j, \mathbf{Y}_j)$, вычислим теперь их переходные вероятности (ядра), распространив действие операторов сдвигов Sh и пополнения Ad на их значения $\mathbf{v}_j = (\mathbf{x}_j, \mathbf{y}_j)$, заменяя в формулах (2, 3) заглавные буквы на прописные

$$x_{Sh}^i[\mathbf{x}_n, x] = x^i - x, \quad \text{при } i = \overline{1, n};$$

$$x_{Ad}^i[\mathbf{x}_n, x] = \begin{cases} x^i & \text{для } i < r, \\ x & \text{для } i = r, \\ x^{i+1} & \text{для } i > r, \end{cases} \quad (16)$$

где $r = \max \{i : x^i \leq x\}$.

Через $P_j(\mathbf{v}_j, C_{j+1})$ и $Q_j(\mathbf{v}_j, C_{j-1})$ обозначим переходные вероятности (ядра) преобразований меток при переходе из состояния основного процесса j в состояния $j+1$ и $j-1$ соответственно,

$$P_j(\mathbf{v}_j; C_{j+1}) = P\{X_j^{(i)} \leq Y_j^{(i)}, \mathbf{V}_{j+1} \in C_{j+1} \mid \mathbf{V}_j = \mathbf{v}_j\};$$

$$Q_j(\mathbf{v}_j; C_{j-1}) = P\{X_j^{(i)} > Y_j^{(i)}, \mathbf{V}_{j-1} \in C_{j-1} \mid \mathbf{V}_j = \mathbf{v}_j\}.$$

Имея в виду, что при переходе основного процесса из одного состояния в другое значения $\mathbf{v}_j = (\mathbf{x}_j, \mathbf{y}_j)$ меток $\mathbf{V}_j = (\mathbf{X}_j, \mathbf{Y}_j)$ преобразуются с помощью операторов сдвигов и пополнения в соответствии с формулами (10)–(15), при этом только одна из них приобретает новое значение, определим переходные вероятности (ядра) на специальных множествах. При построении этих множеств будем пользоваться следующими обозначениями:

- для интервалов

$$\Delta_j^i Sh[\mathbf{x}_j, y_j^1] = (x_j^{i-1} - y_j^1, x_j^i - y_j^1],$$

$$\Delta_j^i Sh[\mathbf{y}_j, y_j^1] = (y_j^{i-1} - y_j^1, y_j^i - y_j^1];$$

- для приращений ф.р. в соответствующих точках

$$\Delta_j^i A(Sh[\mathbf{x}_j, y_j^1]) = A(x_j^i - y_j^1) - A(x_j^{i-1} - y_j^1),$$

$$\Delta_j^i B(Sh[\mathbf{y}_j, y_j^1]) = B(y_j^i - y_j^1) - B(y_j^{i-1} - y_j^1),$$

$$\Delta_j^i A(Sh[\mathbf{x}_j, x_j^1]) = A(x_j^i - x_j^1) - A(x_j^{i-1} - x_j^1),$$

$$\Delta_j^i B(Sh[\mathbf{y}_j, x_j^1]) = B(y_j^i - x_j^1) - B(y_j^{i-1} - x_j^1).$$

Используя эти обозначения, построим специальные множества, в которых возможен переход за один шаг. Если при отказе одной из компонент до отказа всей системы в целом имеются свободные ремонтные устройства, то система переходит из состояния $j < l$ в

состояние $j+1$. При этом определим множество $C_{j+1}^{(i)}(\mathbf{v}_j)$ как множество тех значений $\mathbf{v}_{j+1}$ меток $\mathbf{V}_{j+1}$, для которых компонента $\mathbf{x}_{j+1}$ приобретает значение сдвинутой на величину x_j^1 компоненты $\mathbf{x}_j$, а значение $\mathbf{y}_j$ метки $\mathbf{Y}_j$ после сдвига на величину x_j^1 дополняется новой компонентой на позицию i , формально:

$$C_{j+1}^{(i)}(\mathbf{v}_j) = \{\mathbf{v}_{j+1} : Ad[Sh[\mathbf{v}_j, x_j^1], B_{i+1} \in \Delta_j^i Sh[\mathbf{y}_j, x_j^1]]\}.$$

Аналогично, при $j \geq l$, когда все средства ремонта заняты, определим множество $C_{j+1}(\mathbf{v}_j)$ как множество тех значений $\mathbf{v}_{j+1}$ метки $\mathbf{V}_{j+1}$, которые получаются простым сдвигом значений $\mathbf{v}_j$ на величину x_j^1 , формально:

$$C_{j+1}(\mathbf{v}_j) = \{\mathbf{v}_{j+1} : Sh[\mathbf{v}_j, x_j^1]\}.$$

Соответственно, при окончании ремонта одного из элементов системы он возвращается к работе и в случае отсутствия очереди на ремонт новых элементов, то есть при переходе основного процесса из состояния $j \leq l$ в состояние $j-1$, определим множество $C_{j-1}^{(i)}(\mathbf{v}_j)$ как набор сдвинутых на величину $y_j^{(i)}$ значений меток $\mathbf{v}_j$ и пополнение на величину A_{i+1} вновь начавшего работать элемента на i -ую позицию сдвинутой на величину y_j^1 метки $\mathbf{x}_j$, формально:

$$C_{j-1}(\mathbf{v}_j) = \{\mathbf{v}_{j-1} : Ad[Sh[\mathbf{v}_j, y_j^1], A_{i+1} \in \Delta_j^i Sh[\mathbf{x}_j, y_j^1]]\}.$$

Аналогично, при окончании ремонта одного из элементов системы, когда имеются ожидающие ремонта элементы, то есть при переходе из состояния $j > l$ в состояние $j-1$, дополнительно к предыдущему необходимо учесть постановку на ремонт элемента из очереди. Поэтому дополнительно к предыдущему определим множество $C_{j-1}^{(i_1, i_2)}(\mathbf{v}_j)$ как набор сдвинутых на величину y_j^1 значений $\mathbf{v}_j$ метки $\mathbf{V}_j$, при этом сдвинутое на величину y_j^1 значение $\mathbf{x}_j$ метки $\mathbf{X}_j$ дополняется на некоторую позицию i_1 величиной в.б.р. A_{i+1} вновь отремонтированного элемента, а значение $\mathbf{y}_j$ метки $\mathbf{Y}_j$ дополняется на некоторую i_2 -ую позицию временем ремонта B_{i+1} принятого к ремонту элемента, поступившего из очереди. Формально это запишется как

$$C_{j-1}^{(i_1, i_2)}(\mathbf{v}_j) = \left\{ \mathbf{v}_{j-1} : Ad \left[\begin{array}{c} Sh[\mathbf{v}_j, y_j^1], \\ A_{i+1} \in \Delta_j^{i_1} A(Sh[\mathbf{x}_j, y_j^1]), \\ B_{i+1} \in \Delta_j^{i_2} B(Sh[\mathbf{y}_j, y_j^1]) \end{array} \right] \right\}.$$

В терминах введенных множеств переходные вероятности (ядра) последовательности меток представлены в следующей лемме.

Лемма 2. *Переходные вероятности (ядра) для преобразования меток при переходе основного процесса из состояния j в состояние $j+1$ имеют вид: при $j < l$*

$$P_j(\mathbf{v}_j; C_{j+1}) = \begin{cases} \Delta_j^i B(Sh[\mathbf{y}_j, x_j^1]) & \text{для } C_{j+1} = C_{j+1}^{(i)}(\mathbf{v}_j), \\ 0 & \text{в остальных случаях;} \end{cases}$$

при $j \geq l$

$$P_j(\mathbf{v}_j; C_{j+1}) = \begin{cases} 1_{Ad[\mathbf{v}_j, y_j^1] \in C_{j+1}} & \text{для } C_{j+1} = C_{j+1}(\mathbf{v}_j) \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (17)$$

Аналогично при переходе из состояния j в состояние $j-1$ переходные вероятности имеют вид: при $j \leq l$

$$Q_j(\mathbf{v}_j; C_{j-1}) = \begin{cases} \Delta_j^i A(Sh[\mathbf{x}_j, y_j^1]) & \text{для } C_{j-1} = C_{j-1}^{(i)}(\mathbf{v}_j) \\ 0 & \text{в остальных случаях;} \end{cases}$$

при $j > l$

$$Q_j(\mathbf{v}_j; C_{j-1}) = \begin{cases} \Delta_j^{i_1} A(Sh[\mathbf{x}_j, y_j^1]) \cdot \Delta_j^{i_2} B(Sh[\mathbf{y}_j, y_j^1]) & \text{для } C_{j-1} = C_{j-1}^{(i_1, i_2)}(\mathbf{v}_j) \\ 0 & \text{в остальных случаях.} \end{cases} \quad (18)$$

Доказательство. Доказательство вытекает непосредственно из определения множеств $C_{j-1}(\mathbf{v}_j)$, $C_{j-1}^{(i)}(\mathbf{v}_j)$ и $C_{j+1}(\mathbf{v}_j)$, $C_{j+1}^{(i)}(\mathbf{v}_j)$.

На основе полученных выражений рассмотрим распределения меток.

3. Распределения меток

3.1. Распределения меток в терминах мер

Рассмотрим сначала распределения меток в терминах их мер. Обозначим через $\mu_j(t, \cdot)$ меры меток $\mathbf{V}_j(t) = (\mathbf{X}_j(t), \mathbf{Y}_j(t))$ на шаге t ,

$$\mu_j(t, \cdot) = P\{\mathbf{V}_j(t) \in \cdot\}.$$

Вспоминая, что переходные ядра преобразований меток P_j и Q_j выражаются в терминах распределений с.в. A и B и опираясь на преобразования меток, выпишем соответствующие соотношения для преобразования мер

$$\begin{aligned} \mu_j(t+1, \cdot) &= \int \mu_{j-1}(t, d\mathbf{v}_{j-1}) P_{j-1}(\mathbf{v}_{j-1}, \cdot) + \\ &+ \int \mu_{j+1}(t, d\mathbf{v}_{j+1}) Q_{j+1}(\mathbf{v}_{j+1}, \cdot), \end{aligned}$$

которые в операторных обозначениях можно переписать в виде

$$\mu_j(t+1, \cdot) = \mu_{j-1} P_{j-1}(t, \cdot) + \mu_{j+1} Q_{j+1}(t, \cdot).$$

Заметим, что за счет сдвигов и пополнений мера меток распространяется на всю σ -алгебру измеримых множеств состояний меток.

3.2. Распределения меток в терминах плотностей

В частном случае в предположении об абсолютной непрерывности распределений с.в. A и B меры меток процесса Z также абсолютно непрерывны,

$$\mu_j(t; C) = \int_C \dots \int f_j(t; x^1, \dots, x^{n-j}, y^1, \dots, y^{j \wedge l}) \prod_{1 \leq i \leq n-j} dx^i \prod_{1 \leq i \leq j \wedge l} dy^i,$$

где функции $f_j(t; \mathbf{v}_j)$ представляют собой плотности распределений меток процесса Z . Доказательство можно провести по индукции, отправляясь от начального состояния $j=0$ в момент $t=0$, в котором метка имеет плотность $a(\cdot)$. На следующем шаге при $t=1$ состояние $j=1$ меток имеет плотность $a(\cdot)b(\cdot)$. Далее, так как операторы сдвига и пополнения меток абсолютно непрерывными с.в. не нарушают их абсолютной непрерывности, то это завершает доказательство.

Уравнения для п.р. меток процесса Z в соседних состояниях на двух последующих шагах с использованием обозначений

$$\mathbf{x}_j^i = (x_j^1, \dots, x_j^{i-1}, x_j^{i+1}, \dots, x_j^{n-j}), \quad \mathbf{y}_j^i = (y_j^1, \dots, y_j^{i-1}, y_j^{i+1}, \dots, y_j^{n-j}),$$

$$\mathbf{x}_j^i + u = (x_j^1 + u, \dots, x_j^{i-1} + u, x_j^{i+1} + u, \dots, x_j^{n-j} + u),$$

$$\mathbf{y}_j^i + u = (y_j^1 + u, \dots, y_j^{i-1} + u, y_j^{i+1} + u, \dots, y_j^{n-j} + u),$$

$$\Delta A(x_j^i) = A(x_j^i) - A(x_j^{i-1}), \Delta B(y_j^i) = B(y_j^i) - B(y_j^{i-1})$$

представлены в теореме. При формулировке и доказательстве теоремы напомним, что размерности меток в состояниях j процесса Z равны: $k-j$ для метки $\mathbf{x}_j$ и $j \wedge l$ для метки $\mathbf{y}_j$.

Теорема 2. *П.р. меток процесса Z в соседних состояниях $j-1, j, j+1$ на двух последующих шагах t и $t+1$ связаны соотношениями: при $j \leq l$*

$$\begin{aligned} f_j(t+1; \mathbf{x}_j, \mathbf{y}_j) &= \sum_{1 \leq i \leq j \wedge l} b(y_j^i) \Delta B(y_j^i) \cdot \\ &\cdot \int_{u \leq y_j^i} f_{j-1}(t; u, \mathbf{x}_j + u, \mathbf{y}_j^i + u) du + \\ &+ \sum_{1 \leq i \leq k-j} a(x_j^i) \Delta A(x_j^i) \int_{u \leq x_j^i} f_{j+1}(t; x_j^i + u, u, \mathbf{y}_j + u) du; \end{aligned} \quad (19)$$

при $j > l$

$$\begin{aligned} f_j(t+1; \mathbf{x}_j, \mathbf{y}_j) &= \int_{u \leq y_j^l} f_{j-1}(t; u, \mathbf{x}_j + u, \mathbf{y}_j^l + u) du + \\ &+ \sum_{1 \leq i \leq j \wedge l} b(y_j^i) \Delta B(y_j^i) \int_{u \leq x_j^i} f_{j+1}(t; x_j^i + u, u, \mathbf{y}_j + u) du. \end{aligned} \quad (20)$$

Доказательство. Чтобы на шаге $t+1$ процесс Z оказался в состоянии $j \leq l$ в окрестности точки $\mathbf{v}_j = (\mathbf{x}_j, \mathbf{y}_j)$, вероятность чего равна $f_j(t+1; \mathbf{x}_j, \mathbf{y}_j) d\mathbf{x}_j d\mathbf{y}_j$, необходимо и достаточно чтобы:

а) либо на шаге t процесс Z находился в состоянии $j-1$ в окрестности точки $(u, \mathbf{x}_j + u, \mathbf{y}_j^l + u)$ с минимальным остаточным в.б.р. $u \leq y_j^l$, и свободной одной из позиций вектора $\mathbf{y}_j$, вероятность чего равна $f_{j-1}(t; u, \mathbf{x}_j + u, \mathbf{y}_j^l + u) du d\mathbf{x}_j d\mathbf{y}_j^l$, произошел отказ этого элемента, что привело к сдвигу компонентов вектора $\mathbf{v}_j$ на величину u и поступлению отказавшего элемента на ремонт, то есть в компоненты сдвинутого вектора $\mathbf{y}_j$ на i -ую позицию добавилась координата y_j^i с вероятностью $\Delta B(y_j^i) b(y_j^i) dy_j^i$, что объясняет первое слагаемое справа в формуле (19);

б) либо на шаге t процесс Z находился в состоянии $j+1$ в окрестности точки $(\mathbf{x}_j^i + u, u, \mathbf{y}_j + u)$ с минимальным остаточным временем ремонта u и свободной одной из позиций, скажем i -ой, вектора $\mathbf{x}_j$, вероятность чего равна $f_{j+1}(t; \mathbf{x}_j^i + u, u, \mathbf{y}_j + u) d\mathbf{x}_j^i du d\mathbf{y}_j$, и закончился ремонт этого элемента, что привело к сдвигу компонентов вектора $\mathbf{v}_j$ на величину u , при этом отремонтированный элемент приступил к работе, и его в.б.р. заняло i -ую позицию с вероятностью $\Delta A(x_j^i) a(x_j^i) dx_j^i$, что объясняет второе слагаемое справа в формуле (19).

Аналогично, чтобы на шаге $t+1$ при наличии ожидающих ремонта элементов, процесс оказался в состоянии $j > l$ со значением меток $f_j(t+1; \mathbf{x}_j, \mathbf{y}_j)$, вероятность чего равна $f_j(t+1; \mathbf{x}_j, \mathbf{y}_j) d\mathbf{x}_j d\mathbf{y}_j$, необходимо и достаточно, чтобы на предыдущем шаге

а) либо он находился в состоянии $j-1$ с минимальным остаточным в.б.р. u и произошел отказ этого элемента, что привело к сдвигу компонентов меток $\mathbf{v}_j$ на величину u , и отказавший элемент поступил в очередь на ремонт или был потерян в зависимости от состояния системы, что объясняет первое слагаемое уравнения (20);

б) либо он находился в состоянии $j+1$ с минимальным остаточным временем ремонта u , вероятность чего равна $f_{j+1}(t; \mathbf{x}_j^i + u, u, \mathbf{y}_j + u) d\mathbf{x}_j^i du d\mathbf{y}_j$, закончился его ремонт, что привело к сдвигу компонентов меток $\mathbf{v}_j$ на величину u , отремонтированный элемент приступил к работе и его метка заняла i -ую позицию с вероятностью $\Delta A(x_j^i) a(y_j^i) dx_j^i$, что объясняет второе слагаемое в формуле (20) и завершает доказательство теоремы.

Полученные в последнем разделе соотношения вряд ли могут быть использованы для реального анализа функции надежности системы и ее свойств. Поэтому в следующем разделе обратимся к непосредственному вычислению функции надежности с помощью преобразования меток. Ее вычисление опирается на методы имитационного моделирования. При этом предложенный метод не требует специальной разработки алгоритмов, они непосредственно используются для реализации предложенных процедур. Таким образом, предложенный подход открывает новые возможности метода имитационного моделирования.

4. Вычисление функции надежности модели

Основой применения метода имитационного моделирования (для вычисления в данном случае функции надежности) является достижимость состояния k из любого начального состояния с вероятностью 1 и, более того, конечность среднего времени достижения этого состояния для любого начального состояния $E[R] < \infty$ (аналог положительной возвратности процесса Z при исследовании стационарного режима).

Следуя методике мажорирования процесса Z , предложенной в [10], можно показать, что для этого достаточно выполнения условия

$$P\{A < B\} > 0.$$

Предполагая это условие выполненным, в следующей части статьи предлагаются процедура и алгоритм вычисления функции надежности системы и ее моментов.

Для вычисления времени до первого отказа R можно воспользоваться моментами изменения состояний системы или интервалами между ними до момента первого посещения поглощающего состояния k ,

$$R = S(M) = \sum_{t \geq 1} T_{J(t)}(t) 1_{J(t) \leq k} = \sum_{t \geq 1} \min [X_{J(t)}^{(t)}, Y_{J(t)}^{(t)}] 1_{J(t) \leq k},$$

где величины $S(\cdot)$ и $T_{J(t)}(t)$ были введены соотношениями (8), (9). Для получения соответствующих оценок эти величины следует вычислять для достаточно большого числа M траекторий.

Заключение

В работе вводится понятие маркированного марковского процесса, которое применяется для исследования системы $\langle GI_{k,n} | GI \rangle$. Приведены преобразования меток, которые используются для вычисления основных характеристик модели. Получены уравнения для мер меток в переходном и стационарном режимах. Представлены основные характеристики надежности этой системы в терминах мер для меток.

Следующая часть статьи будет посвящена численному анализу и исследованию чувствительности характеристик надежности системы к виду распределений в.б.р. и ремонта, а также к соответствующим значениям коэффициента вариации.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-49-02023 (получатель Иванова Н.М.).

Библиографический список

1. Rykov V. Decomposable semi-regenerative processes and their applications. LAMBERT Academic Publishing, 2010. 75 p.

2. Glynn P.W. A GSMP formalism for discrete event systems // *Proceedings of the IEEE*. 1989. No. 1. Vol. 77. Pp. 14-23. DOI: 10.1109/5.21067

3. Glynn P.W., Haas P.J. Laws of large numbers and functional central limit theorems for generalized semi-markov processes, // *Stochastic Models*. 2006. Vol 22. Is. 2. Pp. 201-231. DOI: 10.1080/15326340600648997

4. Glynn P.W., Haas P.J. On transience and recurrence in irreducible finite-state stochastic systems // *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation*. 2015. No. 4. Vol. 25. Pp. 1-19. DOI: 10.1145/2699721

5. Rykov V. On Reliability of a double redundant renewable system // In: Gribaudo, M., Sopin, E., Kochetkova, I. (eds) *Analytical and Stochastic Modelling Techniques and Applications*. ASMTA 2019. Lecture Notes in Computer Science() / 2020. Vol 12023. DOI: 10.1007/978-3-030-62885-7_3

6. Rykov V., Efrosinin D., Stepanova N. et al. On Reliability of a Double Redundant Renewable System with a Generally Distributed Life and Repair Times // *Mathematics*. 2020. Vol. 8. Is. 2. DOI: 10.3390/math8020278

7. Рыков В., Иванова Н. О надежности восстанавливаемой дублированной системы с произвольными распределениями времени безотказной работы и восстановления ее элементов // *Материалы XXII-й Международной конференции имени А. Ф. Терпугова*. Томск: Томский государственный университет. 2023. С. 335-340.

8. David H.A., Nagaraja H.N. Order statistics, 3rd ed. John Wiley & Sons: New York, NY, USA. 2003. DOI: 10.1002/0471722162

9. Rykov V., Kozyrev D., Filimonov A. et al. On reliability of a k-out-of-n system with general repair time distribution // *Probability in the Engineering and Informational Sciences*. 2020. Vol. 35. No 4. Pp. 885 – 902. DOI: 10.1017/S0269964820000285

10. Morozov E., Steyaert B. Stability analysis of regenerative queueing models. Springer, Cham, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-82438-9

References

1. Rykov V. Decomposable semi-regenerative processes and their applications. LAMBERT Academic Publishing; 2010.

2. Glynn P.W. A GSMP formalism for discrete event systems. *Proceedings of the IEEE* 1989;1(77):14-23. DOI: 10.1109/5.21067.

3. Glynn P.W., Haas P.J. Laws of large numbers and functional central limit theorems for generalized semi-Markov processes. *Stochastic Models* 2006;22(2):201-231. DOI: 10.1080/15326340600648997.

4. Glynn P.W., Haas P.J. On transience and recurrence in irreducible finite-state stochastic systems. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation* 2015;4(25):1-19. DOI: 10.1145/2699721.

5. Rykov V. On reliability of a double redundant renewable system. In: Gribaudo M., Sopin E., Kochetkova I., editors. Analytical and Stochastic Modelling Techniques and Applications. ASMTA 2019. Lecture Notes in Computer Science 2020, Vol. 12023. DOI: 10.1007/978-3-030-62885-7_3.
6. Rykov V., Efrosinin D., Stepanova N. et al. On Reliability of a Double Redundant Renewable System with a Generally Distributed Life and Repair Times. *Mathematics* 2020;8(2). DOI: 10.3390/math8020278.
7. Rykov V., Ivanova N. [On the dependability of a restorable redundant system with general distributions of fault-free operation and restoration times of its elements]. In: [Proceedings of the XXII International A.F. Terpugov Conference]. Tomsk: Tomsk State University; 2023. Pp. 335-340. (in Russ.)
8. David H.A., Nagaraja H.N. Order statistics. 3rd ed. John Wiley & Sons: New York (USA); 2003. DOI: 10.1002/0471722162.
9. Rykov V., Kozyrev D., Filimonov A. et al. On reliability of a k-out-of-n system with general repair time distribution. *Probability in the Engineering and Informational Sciences* 2020;35(4):885-902. DOI: 10.1017/S0269964820000285.
10. Morozov E., Steyaert B. Stability analysis of regenerative queueing models. Springer, Cham; 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-82438-9.

Сведения об авторах

Рыков Владимир Васильевич – доктор физико-математических наук, профессор, профессор, Российский

государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1, Москва, Российская Федерация, e-mail: vladimir_rykov@mail.ru

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

About the authors

Vladimir V. Rykov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor, Gubkin University, 65, korp. 1 Leninsky prospekt, Moscow, Russian Federation, e-mail: vladimir_rykov@mail.ru.

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

Вклад авторов

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

Ивановой Н.М. разработала алгоритм имитационного моделирования и выполнила численный анализ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Выбор алгоритма машинного обучения для обнаружения вторжений в IoT

Choosing the machine learning algorithm for detecting intrusions into IoT

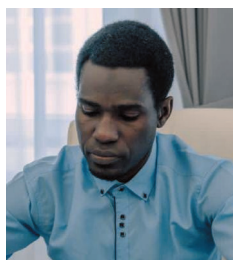
Нианг П.М.^{1*}, Сидоренко В.Г.¹

Niang P.M.^{1*}, Sidorenko V.G.¹

¹РУТ(МИИТ), Москва, Российская Федерация

¹RUT(MIIT), Moscow, Russian Federation

*malickdiarra30@gmail.com



Нианг П.М.



Сидоренко В.Г.

Резюме. Цель. Целью работы является повышение безопасности IoT-устройств путем применения алгоритмов машинного обучения для обнаружения атак в сетях IoT. Актуальность поставленной цели определяется постоянным ростом числа подобных атак в мире и широким распространением систем IoT. В статье приведены соответствующие статистические данные. Анализ имеющихся работ показал, что различные методы рассматривались без связи и сравнения друг с другом, поэтому цель данной работы – определить наиболее перспективный алгоритм машинного обучения для обнаружения атак в сетях IoT – актуальна. **Методы.** В статье для обнаружения атак в сетях IoT использовались следующие методы машинного обучения: логистическая регрессия, SVC, «случайный лес», метод K-ближайших соседей, метод k-средних, наивный байесовский классификатор и варианты градиентного бустинга (XGBoost, AdaBoost и CatBoost). Новым является сравнение результатов применения контролируемых алгоритмов с алгоритмом K-means, который является неконтролируемым алгоритмом, для обнаружения атак в сетях IoT. Для обучения создаваемых систем обнаружения атак использовался набор данных UNSWNB15, который содержит данные о девяти видах атак. Количество записей составляет более 80 тысяч. Более половины записей – это записи об атаках. Сравнение методов проводилось по нескольким метрикам. **Результаты.** Разработана структура и реализована программно система обнаружения вторжений, включающая этапы от анализа исходных данных до вывода окончательных статистических данных. Результаты показывают, что алгоритм «случайный лес» является лучшим из рассмотренных. Одновременно метод имеет хорошие показатели по быстроте действия обучения. Это означает, что данный алгоритм может быть развернут и применен с наибольшим успехом. **Заключение.** В этой статье представлены результаты сравнения различных алгоритмов машинного обучения для обнаружения вторжений в устройства IoT. Точность и кривая ROC-AUC используются для оценки эффективности используемых моделей. Сравнивая используемые модели алгоритмов, мы обнаружили, что модель RandomForestClassifier алгоритма Random Forest имеет хорошую точность, самый высокий AUC и быстрое время выполнения, а это означает, что этот алгоритм является наиболее эффективным при обнаружении вторжений в сети IoT. Продолжение исследований связано с различением типа атаки.

Abstract. Aim. The paper aims to improve the security of IoT devices by applying machine learning algorithms to detect attacks against IoT networks. The relevance of the goal is defined by the ever-growing number of such attacks around the world and the widespread use of IoT systems. The paper provides relevant statistical data. An analysis of the available papers showed that various methods were examined individually and were not compared to each other, so the aim of this paper that consists in identifying the most promising machine learning algorithm for detecting attacks against IoT networks is of relevance. **Methods.** The paper used the following machine learning methods to detect attacks against IoT networks: logistic regression, SVC, random forest, K-nearest neighbour method, k-means method, naive Bayes classifier, and variants of gradient boosting (XGBoost, AdaBoost, and CatBoost). The novelty consists in the comparison of the outputs of the supervised algorithms with the unsupervised K-means in the context of detection of attacks against IoT networks. The attack detection systems under development were trained using the UNSWNB15 dataset that contains data on nine types of attacks. The number of entries is more than 80 thousand. More than half of the entries deal with attacks. The methods were compared using a number of metrics. **Results.** An intrusion detection system was structurally defined and implemented. The stages of its operation include the analysis of input data and the output of final statistical data. The results show that the random forest algorithm is the best one out of those examined. The method also performs well in terms of learning speed. That means that the algorithm can be deployed and applied with the greatest success. **Conclusions.** This paper presents the

results of comparing various machine learning algorithms in the context of IoT device intrusion detection. The accuracy and the ROC-AUC curve are used to evaluate the efficiency of the employed models. Having compared the models of the employed algorithms we found that the RandomForestClassifier model has the highest accuracy and a high AUC, which means that this algorithm is the most efficient in terms of IoT network intrusion detection. Further research will be dedicated to distinguishing between the types of attack.

Ключевые слова: Интернет вещей, обнаружение вторжений, машинное обучение.

Keywords: Internet of things, intrusion detection, machine learning.

Для цитирования: Нианг П.М., Сидоренко В.Г. Выбор алгоритма машинного обучения для обнаружения вторжений в IoT // Надежность. 2024. №3. С. 44-51. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-3-44-51>

For citation: Niang P.M., Sidorenko V.G. Choosing the machine learning algorithm for detecting intrusions into IoT. Dependability 2024;3:44-51. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-3-44-51>

Поступила: 29.02.2024 / **После доработки:** 16.05.2024 / **К печати:** 09.09.2024

Received on: 29.02.2024 / **Revised on:** 16.05.2024 / **For printing:** 09.09.2024

Введение

Интернет вещей (IoT) соединяет различные устройства, датчики и системы через Интернет, позволяя им обмениваться данными и автоматизировать процессы. За последние годы использование подобных устройств значительно возросло. Этими устройствами можно управлять и получать к ним доступ в любое время и в любом месте через Интернет. IoT можно определить как взаимосвязь между Интернетом и физическими объектами, местами и окружающей средой. Отдельные области IoT касаются транспорта, промышленности, домашней автоматизации, здравоохранения, умного дома и т. д.

В этой статье основное внимание уделяется сетевой безопасности устройств IoT. Эти устройства особенно уязвимы для многих кибератак из-за низкого энергопотребления и низких требований к вычислительным ресурсам, что затрудняет реализацию аутентификации и криптографии в них.

Система обнаружения вторжений (IDS) является решением безопасности для устройств IoT. Обнаружение сетевых вторжений на основе аномалий играет важную роль в защите сетей от различных вредоносных действий. Обнаружение вторжений – это процесс сканирования интеллектуальных устройств и сетевых

источников на предмет несанкционированной активности. При взломе сети или устройства безопасность оказывается под угрозой. Из-за незаконных действий злоумышленника система не отвечает на запросы пользователей. IDS предназначена для поддержания безопасности системы путем выявления несанкционированных действий. Обеспечение конфиденциальности, целостности и доступности является важнейшим параметром IDS. Когда происходит вторжение, информация теряет свою конфиденциальность, целостность или доступность.

Сетевые атаки на IoT-устройства с каждым годом становятся все более масштабными. На рис. 1 представлена статистика атак на IoT-решения с 2018 по 2023 год [1]. На рис. 2 показаны десять стран и территорий,

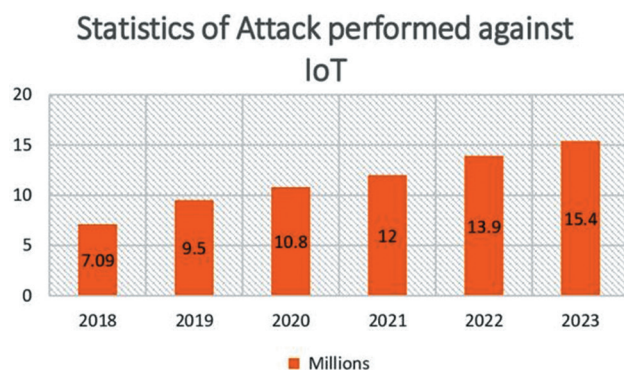


Рис. 1. Статистика атак на IoT [1]

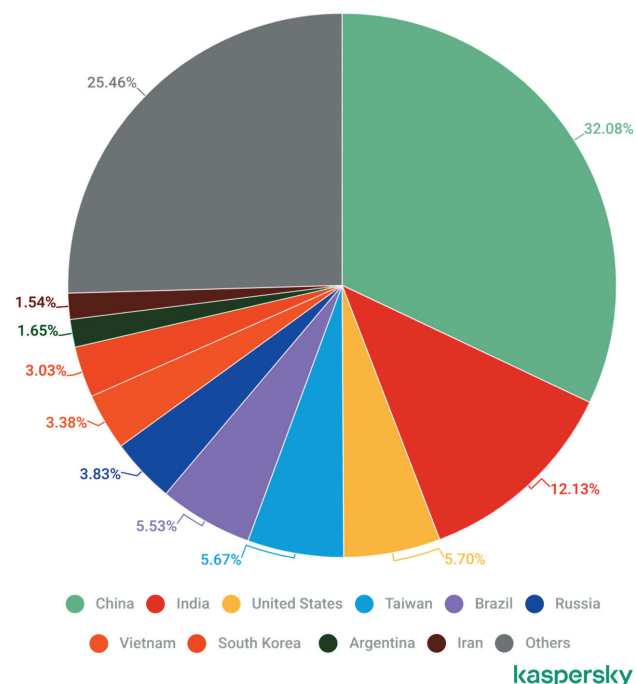


Рис. 2. Десять стран и территорий, где находилось большинство устройств, атаковавших приманки Касперского в 2023 г. [2]

где располагалось большинство атакующих [2]. Данное исследование показывает, что на долю России приходится 3,83%, а Сенегал входит в состав группы стран, обозначенных «Others», на долю которых приходится 25,46% атакующих.

Основная цель IDS – точно идентифицировать атаки с меньшим количеством ложных тревог. Алгоритмы машинного обучения широко используются при разработке IDS благодаря своей скорости, эффективности и высокой производительности [3, 4].

Цель данной работы – определение возможности использования алгоритмов машинного обучения для обнаружения атак в сетях IoT и повышения безопасности IoT-устройств. Статья включает в себя анализ состояния вопроса, синтез архитектуры и методологии предлагаемой системы, тестирование и сравнительный анализ результатов, заключение.

1. Анализ состояния вопроса

Многие исследователи разработали и внедрили различные модели для обнаружения атак в сетях IoT с использованием различных методов.

В работе [4] предложена реализация обнаружения угроз в IoT на основе искусственных нейронных сетей для решения проблем аутентификации. Они использовали контролируемый алгоритм обучения для обнаружения атак, в рамках которого контроллер отклоняет команды после того, как классифицирует их как угрозу. В работе [5] показана возможность применения различных алгоритмов машинного обучения для эффективного обнаружения аномалий в наборе данных о вторжениях в сети IoT. В работе [6] предложена архитектура системы обнаружения сетевых вторжений на основе Ensemble Learning под названием ELNIDS для обнаружения атак маршрутизации на протокол маршрутизации IPv6 для сетей с низким энергопотреблением и потерями. Реализовано четыре различных классификатора машинного обучения на основе ансамблей, включая Boosted Trees, Bagged Trees, Subspace Discriminant и RUSBoosted Trees. Для оценки предложенной модели обнаружения вторжений они использовали набор данных RPL-NIDDS17, который содержит следы пакетов атак. В работе [3] предложена IDS на основе глубокого обучения и машинного обучения для борьбы с атаками безопасности в сетях IoT. В модели обнаружения атак используются сети длинной краткосрочной памяти (LSTM) и метод K-ближайших соседей (KNN), а производительность этих алгоритмов сравнивается друг с другом на основе значений времени обнаружения, статистики Каппа, среднего геометрического и чувствительности. В работе [3] разработана IDS для сред IoT с использованием комбинации методов машинного обучения (наивное дерево Байеса (NBTree), случайное дерево (RandomTree), дерево решений (Decision Tree)), посредством которой пользователь получает предупреждение в случае обнаружения аномалии.

В работе [7] выполнено сравнение нескольких алгоритмов глубокого обучения, включая алгоритмы: глубокая нейронная сеть (DNN), сверточная нейронная сеть (CNN), длинная кратковременная память (LSTM) и автоэнкодер (AE), чтобы определить наиболее эффективный алгоритм решения проблем сетевой безопасности с использованием обнаружения вторжений. В исследовании использовался набор данных UNSW-NB15 для тестирования и бинарная классификация для оценки. Результаты показали, что алгоритм DNN достиг значения точности 99,76% и значения потерь 0,006%, превзойдя другие алгоритмы. В работе [8] предложен подход, который включал использование алгоритма «случайный лес» (Random Forest) для уменьшения размерности и выбора оптимального подмножества исходного набора данных. Затем для обнаружения и идентификации вторжений использовался метод ансамблевого обучения. В работе [9] показана важность фильтрации и выборки трафика для оценки надежности устройств Интернета вещей. В работе [10] предложили метод, который реализует IDS, использующую обратное распространение ошибки (BP) вместе с радиальной нейронной сетью с базисной функцией (BFR). В работе [11] представлена работа над IDS путем обнаружения аномалий в сети умного дома с использованием машины экстремального обучения и искусственной иммунной системы (AIS-ELM). AIS использует клональный алгоритм для оптимизации входных параметров, а ELM анализирует входной параметр для лучшей сходимости при обнаружении аномальной активности.

В публикациях Российских авторов тема безопасности IoT также находит отражение и должна учитываться при разработке концепции и критериев оценки технологической независимости и безопасности объектов критической информационной инфраструктуры [12]. Подобные объекты, как правило, являются элементами более крупных систем, объединенных через Интернет. Системы управления городской транспортной системой могут быть отнесены к этому классу систем [13]. Разработан подход к обнаружению аномалий в сетевом трафике путем определения степени самоподобия трафика с помощью фрактального анализа и статистических методов [14]. Полученные результаты по применению методов машинного обучения для прогнозирования отказов объектов транспортных систем также могут служить основой для развития систем безопасности IoT [15, 16].

Таким образом, в существующих работах различные методы рассматривались без связи и сравнения друг с другом. Основная цель данной работы – определить наиболее перспективный алгоритм машинного обучения для обнаружения атак в сетях IoT.

Для этого мы выбираем различные модели алгоритмов (логистическая регрессия, метод опорных векторов (SVC), случайный лес, KNN, метод k-средних (K-means), наивный байесовский классификатор (Naive

Bayes), варианты реализации градиентного бустинга (XGBoost, AdaBoost и CatBoost) и сравниваем их производительность.

Новыми особенностями нашей работы являются:

- достижение точности, превышающей точность функционирования других алгоритмов, при использовании алгоритма «случайный лес» (т. е. этот алгоритм способен обнаруживать практически все атаки, присутствующие в нашем наборе данных) для надежного набора данных, содержащего современные атаки;
- сравнение алгоритмов машинного обучения;
- сравнение контролируемых алгоритмов с алгоритмом K-means, который является неконтролируемым алгоритмом, чтобы выяснить, какой из этих двух типов алгоритмов является наиболее надежным для обнаружения атак в сетях IoT.

2. Предлагаемая методика

В этом разделе представлена информация о разработанной IDS, ее функциях, выбранных моделях. Для разработки был выбран язык программирования Python, так как в нем есть развитые библиотеки обработки данных, обладающие множеством преимуществ.

Созданная программа работает в среде Python Jupyter Notebook и использует следующие пакеты [17]:

- pandas, numpy – поддержка массивов данных и операций с ними;

- matplotlib, seaborn – библиотека визуализации данных;

- sklearn – платформа для анализа данных и машинного обучения.

Программа использует следующие модели машинного обучения:

- LogisticRegrade() алгоритма логистической регрессии;
- SVC() алгоритма SVC;
- RandomForestClassifier() алгоритма «случайный лес»;
- Kmeans() алгоритма K-means;
- KNeighboursClassifier() алгоритма KNN;
- GaussianNB() алгоритма Naive Bayes ;
- XGBClassifier() алгоритма XGBoost;
- AdaBoostClassifier() алгоритма AdaBoost;
- CatBoostClassifier() алгоритма CatBoost.

В ходе работы программы выполняются следующие шаги:

- подготовка предварительных данных как один из этапов работы модели;
- применение алгоритмов машинного обучения (логистическая регрессия, SVC, Random Forest, KNN, K-means, Naive Bayes, XGBoost, AdaBoost и CatBoost);
- определение наиболее значимых характеристик для каждого алгоритма;
- оценка качества модели по классификации: точность, ROC и AUC.

Табл. 1. Типы атак

Атаки	Количество записей	Описание атаки	Доля записей данного типа
Без атаки (Normal)	37 000	Естественные данные о транзакциях.	44,94%
Фаззерс (Fuzzers)	6062	Попытка вызвать зависание программы или сети путем подачи на нее случайно сгенерированных данных.	7,36%
Анализ (Analysis)	677	Различные атаки порта, сканирование, проникновение спама и html-файлов.	0,82%
Бэкдоры (Backdoor)	583	Метод, при котором механизм скрытно обходит безопасность системы для получения доступа к компьютеру или его данным.	0,71%
Дос (Dos)	4 089	Злонамеренная попытка сделать сервер или сетевой ресурс недоступным для пользователей, обычно это временное прерывание или приостановка предоставления услуг хоста, подключенного к Интернету.	4,97%
Эксплойты (Exploits)	11 132	Злоумышленник знает о проблеме безопасности в операционной системе или части программного обеспечения и использует ее знание при эксплуатации уязвимости.	13,52%
Общий (Generic)	18 871	Техника работает против всех блоков шифра (с заданным блоком и ключом размер), без учета структуры блочного шифра.	22,92%
Разведка (Reconnaissance)	3 496	Содержит все удары, которые можно имитировать. Атаки, направленные на сбор информации.	4,25%
Шеллкод (Shellcode)	378	Маленький фрагмент программного кода использован как полезная нагрузка в эксплуатации его уязвимости.	0,46%
Черви (Worms)	44	Злоумышленник копирует себя, чтобы распространиться на другие компьютеры. Часто это используется в компьютерной сети для распространения себя и получения доступа к целевому компьютеру, полагаясь на сбои в системе безопасности.	0,05%
Всего	82 332	Естественные данные о транзакциях.	100%

3. Сравнительные испытания и анализ

В этой части представлен исследуемый набор данных, выполнено тестирование выбранных моделей, дана оценка их производительности, осуществлен выбор лучшего алгоритма машинного обучения для обнаружения атак в сетях IoT.

Для оценки эффективности IDS необходим современный и полный набор данных, содержащий современные информацию о штатном функционировании системы и под действием атак [18]. Для проведения теста использован набор данных UNSW-NB15. UNSW-NB15 – это современный набор данных о реалистичных атаках и штатном функционировании вычислительных сетей [3]. Этот набор данных использовался в [19, 20] для статистических и оценочных целей путем сравнения пяти различных алгоритмов: кластеризация на основе деревьев решений, логистическая регрессия, наивный байесовский классификатор, приближенные ближайшие соседи и ожидание-максимизация, чтобы измерить их производительность

с точки зрения точности и уровень ложных тревог по сравнению с набором данных KDD99. Результаты оценки показали, что набор данных UNSW-NB15 можно считать более сложным и лучше отражающим современные атаки и обычный сетевой трафик, что делает его более подходящим для оценки методов атак существующей и предлагаемой системы обнаружения вторжений в сеть.

Этот набор данных содержит данные, соответствующие возможным реализациям 9 современных типов атак, и новые нормальные шаблоны трафика, а также 49 атрибутов, которые включают в себя потоки между хостами и проверку сетевых пакетов, чтобы различать нормальные или ненормальные наблюдения.

Набор данных разделен на набор для обучения (файл UNSW_NB15_training-set.csv содержит 82 332 записи разных типов) и набор для тестирования (файл UNSW_NB15_testing-set.csv содержит 175 341 запись разных типов). Подробности о представленных типах атак приведены в табл. 1. Количество данных об атаках в наборе для обучения превышает количество обычных транзакций: 45 332 по сравнению с 37 000.

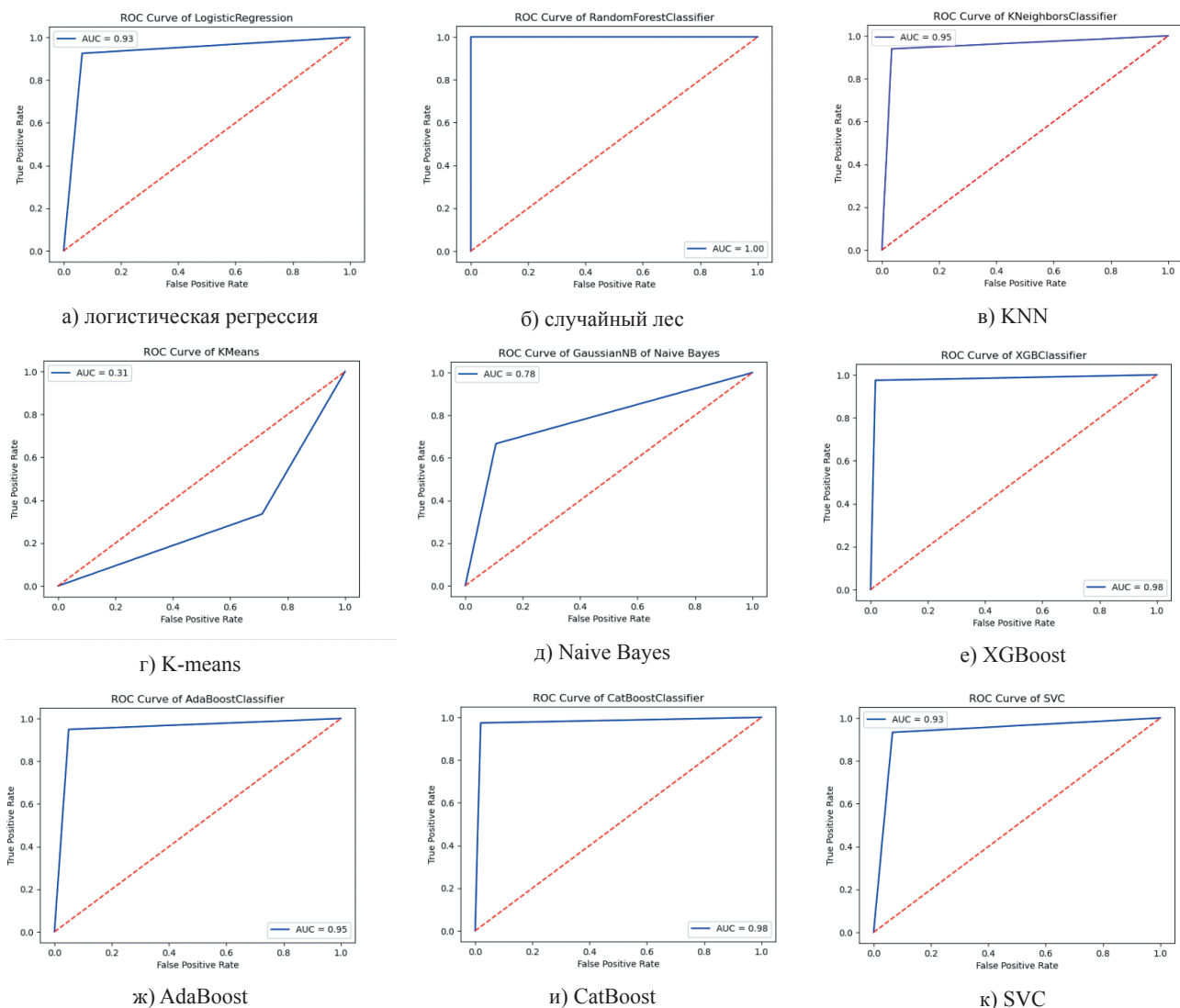


Рис. 3. Кривые ROC, полученные при использовании различных методов машинного обучения

Табл. 2. Сравнение значений метрик и оценок AUC различных алгоритмов

	Логистическая регрессия	SVC	KNN	Random Forest	K-means	Naive Bayes	XGBoost	AdaBoost	Catboost
Precision, %	93,02	93,36	95,19	97,69	31,95	79,53	97,87	94,97	97,73
Recall, %	92,98	93,34	95,11	97,68	31,46	76,84	97,86	94,96	95,72
F1-score, %	92,99	93,35	95,12	97,68	31,64	76,73	97,86	94,96	95,72
TPR	6 922	6 915	7 146	7 256	2 139	6 611	7 277	7 032	7 258
FPR	478	485	254	144	5261	789	123	368	142
FNR	678	611	551	238	6025	3025	229	462	234
TNR	8 389	8 456	8 516	8 829	3 042	6 042	8 838	8 605	8 833
Время обучения, с	101,41	160,76	10,93	6,76	0,64	0,16	12,59	10,15	32,56
AUC	0,93	0,93	0,95	0,98	0,31	0,78	0,98	0,95	0,98

Табл. 3. Сравнение результатов, полученных на обучающем и тестовом наборах данных

Обучающий набор данных									
	Логистическая регрессия	SVC	KNN	Random Forest	K-means	Naive Bayes	XGBoost	AdaBoost	Catboost
Precision, %	93,02	93,36	95,19	97,69	31,95	79,53	97,87	94,97	97,73
AUC	0,93	0,93	0,95	0,98	0,31	0,78	0,98	0,95	0,98
Длительность процесса тестирования, с	101,41	160,76	10,93	6,76	0,64	0,16	12,59	10,15	32,56
Тестовый набор данных									
Precision, %	93,87	93,93	94,71	95,94	40,81	84,41	95,76	94,26	95,78
AUC	0,91	0,90	0,94	0,95	0,33	0,84	0,95	0,92	0,95
Длительность процесса тестирования, с	188,94	547,31	35,90	18,21	1,04	0,22	28,62	23,55	57,62

Регулярные транзакции гораздо важнее любых атак. Общая атака является самой крупной среди атак, а атака «Черви» – самой маленькой. Для обучения моделей использованы данные из набора UNSW_NB15_training-set.csv, а для проверки надежности моделей – из набора UNSW_NB15_testing-set.csv.

В обучающем наборе использовано 16 467 записей, включая 9 067 записей об атаках и 7 400 записей без атак, а в тестовом наборе – 35 069 записей, включая 23 869 записей об атаках и 11 200 записей без атак.

Для каждого алгоритма рассчитаны значения его метрик и кривая ROC-AUC. Кривая ROC-AUC отображает соотношение истинно положительного результата (TPR) и уровня ложноположительного результата (FPR). AUC (площадь под кривой) будет использоваться в качестве единого значения для сравнения различных моделей для оценки их производительности. Оценки AUC варьируются от 0 до 1. Если оценка меньше 0,5, модель неэффективна и, следовательно, алгоритм не может быть успешно применен. Лучшим считается алгоритм с наибольшей AUC [21].

На рис. 3 показаны кривые ROC-AUC для рассмотренных алгоритмов.

В табл. 2 приведены значения метрик для различных методов машинного обучения. В этой таблице использованы следующие обозначения: Precision – точность распознавания типа атак; Recall – доля правильно классифицированных объектов классов от числа всех объектов класса; F1-score – гармоническое значение Precision и

Recall; FNR – ложноотрицательный результат; TNR – истинно-отрицательный результат.

Модели RandomForestClassifier, XGBClassifier, AdaBoostClassifier и CatBoostClassifier алгоритмов Random Forest, XGBoost, AdaBoost и CatBoost имеют самые высокие точности и самые высокие AUC.

Модель RandomForestClassifier быстрее трех последних, ее время выполнения составляет 6,76 секунды, а это означает, что этот алгоритм можно развернуть и применить с наибольшим успехом.

Результаты также показывают, что алгоритм K-means менее эффективен, чем другие рассмотренные алгоритмы обучения с учителем, хотя время его выполнения меньше, чем у Random Forest.

Это подтверждает, что алгоритмы контролируемого обучения более эффективны, чем алгоритмы неконтролируемого обучения, при обнаружении атак в сетях IoT.

При внедрении программных модулей:

- исходные данные были обработаны;
 - реализованы прикладные алгоритмы машинного обучения;
 - оценена точность обнаружения атак с помощью метрик машинного обучения;
 - показана производительность каждого алгоритма с использованием кривой ROC;
 - определено время выполнения алгоритмов;
 - реализована программа в среде ноутбука Jupyter.
- В табл. 3 сравниваются результаты работы алгоритмов на обучающем и тестовом наборах данных.

Работа на наборе тестовых данных дает очень хорошие результаты, аналогичные результатам, полученным на обучающем наборе данных. Это подтверждает качество обучения наших моделей.

Заключение

В этой статье проанализирована применимость таких методы машинного обучения, как логистическая регрессия, SVC, случайный лес, KNN, K-means, Naive Bayes, XGBoost, AdaBoost и CatBoost для обнаружения атак в сетях IoT. Точность и кривая ROC-AUC используются для оценки эффективности используемых моделей. Сравнивая 9 моделей используемых алгоритмов, выявлено, что алгоритм Random Forest имеет хорошую точность, самый высокий AUC и быстрое время выполнения, а это значит, что этот алгоритм можно развернуть и применить с наибольшим успехом. Будущая работа будет направлена на мультиклассификацию для различения типов атак.

Библиографический список

1. Arshad M.Z., Rahman H., Tariq J. et al. Digital Forensics Analysis of IoT Nodes using Machine Learning // *Journal of Computing & Biomedical Informatics*. 2022. Vol. 4. Issue 1. Pp. 1-12.
2. Overview of IoT threats in 2023. URL: <https://securelist.com/iot-threat-report-2023/110644/> (дата обращения: 14.06.2024).
3. Chishakwe S., Ndlovu B.M., Dube S. et al. Intrusion Detection System for IoT environments using Machine Learning Techniques // 2022 1st Zimbabwe Conference of Information and Communication Technologies (ZCICT). IEEE, 2022.
4. Hanif S., Ilyas T., Zeeshan M. Intrusion detection in IoT using artificial neural networks on UNSW-15 dataset // 2019 IEEE 16th international conference on smart cities: improving quality of life using ICT & IoT and AI (HO-NET-ICT). IEEE, 2019.
5. Liu Z., Thapa N., Shaver A. et al. Anomaly detection on iot network intrusion using machine learning // 2020 International conference on artificial intelligence, big data, computing and data communication systems (icABCD). IEEE, 2020.
6. Verma A., Ranga V. ELNIDS: Ensemble learning based network intrusion detection system for RPL based Internet of Things // 2019 4th International conference on Internet of Things: Smart innovation and usages (IoT-SIU). IEEE, 2019.
7. Ikhwan S., Purwanto P., Rochim A.F. Comparison Analysis of Intrusion Detection using Deep Learning in IoT Networks // 2023 11th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT). IEEE, 2023.
8. Ahanger A.S., Khan S.M., Masoodi F.S. Intrusion Detection System for IoT Environment using Ensemble Approaches // 2023 10th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom). IEEE, 2023.
9. Meng W. Intrusion detection in the era of IoT: Building trust via traffic filtering and sampling // *Computer*. 2018. Vol. 51. Issue 7. Pp. 36-43.
10. Wadate A.J., Deshpande S.P. Edge-Based Intrusion Detection using Machine Learning Over the IoT Network // 2023 11th International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology-Signal and Information Processing (ICETET-SIP). IEEE, 2023.
11. Alalade E.D. Intrusion detection system in smart home network using artificial immune system and extreme learning machine hybrid approach // 2020 IEEE 6th World Forum on Internet of Things (WF-IoT). IEEE, 2020.
12. Кривошеин Б.Н., Покровский И.А. Понятия и критерии оценки технологической независимости и безопасности объектов критической информационной инфраструктуры // *Безопасность информационных технологий*. 2023. Т. 30. № 4. С. 39-60.
13. Алексеев В.М., Чичков С.Н. Защита информации в интеллектуальных транспортных системах управления городским транспортом // *Надежность*. 2022. № 22(3). С. 62-68. DOI: 10.21683/1729-26462022-22-3-62-68
14. Веселова В.А., Коломойцев В.С. Подход к обнаружению аномалий в самоподобном сетевом трафике // *Надежность*. 2023. № 23(2). С. 57-63. DOI: 10.21683/1729-2646-2023-2-57-63
15. 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. DOI: 10.21683/1729-2646-2020-20-2-43-53
16. Кулагин М.А., Сидоренко В.Г. Оценка экономической эффективности профилактических мероприятий по сокращению числа нарушений при управлении подвижным составом // *Надежность*. 2022/ № 22(4). С. 37-44. DOI: 10.21683/1729-2646-2022-22-4-37-44
17. Логинова Л.Н., Кулагин М.А. Применение Технологии Jupyter Notebook / Jupyter Hub для эффективного обучения в ВУЗах // *Ректор ВУЗа*. 2021. № 4. С. 32-37.
18. Belouch M., Hadaaj S.E., Idhammad M. A two-stage classifier approach using reptree algorithm for network intrusion detection // *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2017. Vol. 8. No. 6. Pp. 389-394.
19. Nour M., Slay J. The evaluation of Network Anomaly Detection Systems: Statistical analysis of the UNSW-NB15 data set and the comparison with the KDD99 data set // *Information Security Journal: A Global Perspective*. 2016. Vol. 25. Nos. 1-3. Pp. 18-31.
20. Nour M., Slay J. UNSW-NB15: a comprehensive data set for network intrusion detection systems (UNSW-NB15 network data set) // 2015 military communications and information systems conference (MilCIS). IEEE, 2015.
21. Mitchell T.M. *Machine Learning*. New York: McGraw Hill, 1997. XVII, 414 p.

References

1. Arshad M.Z., Rahman H., Tariq J. et al. Digital Forensics Analysis of IoT Nodes using Machine Learning. *Journal of Computing & Biomedical Informatics* 2022;4(1):1-12.

2. Overview of IoT threats in 2023. (accessed 14.06.2024). Available at: <https://securelist.com/iot-threat-report-2023/110644>.
3. Chishakwe S., Ndlovu B.M., Dube S. et al. Intrusion Detection System for IoT environments using Machine Learning Techniques. In: 2022 1st Zimbabwe Conference of Information and Communication Technologies (ZCICT). IEEE; 2022.
4. Hanif S., Ilyas T., Zeeshan M. Intrusion detection in IoT using artificial neural networks on UNSW-15 dataset. In: 2019 IEEE 16th international conference on smart cities: improving quality of life using ICT & IoT and AI (HONET-ICT). IEEE; 2019.
5. Liu Z., Thapa N., Shaver A. et al. Anomaly detection on iot network intrusion using machine learning. In: 2020 International conference on artificial intelligence, big data, computing and data communication systems (icABCD). IEEE; 2020.
6. Verma A., Ranga V. ELNIDS: Ensemble learning based network intrusion detection system for RPL based Internet of Things. In: 2019 4th International conference on Internet of Things: Smart innovation and usages (IoT-SIU). IEEE; 2019.
7. Ikhwan S., Purwanto P., Rochim A.F. Comparison Analysis of Intrusion Detection using Deep Learning in IoT Networks. In: 2023 11th International Conference on Information and Communication Technology (ICoICT). IEEE; 2023.
8. Ahanger A.S., Khan S.M., Masoodi F.S. Intrusion Detection System for IoT Environment using Ensemble Approaches. In: 2023 10th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom). IEEE; 2023.
9. Meng W. Intrusion detection in the era of IoT: Building trust via traffic filtering and sampling. *Computer* 2018;51(7):36-43.
10. Wadate A.J., Deshpande S.P. Edge-Based Intrusion Detection using Machine Learning Over the IoT Network. In: 2023 11th International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology-Signal and Information Processing (ICETET-SIP). IEEE; 2023.
11. Alalade E.D. Intrusion detection system in smart home network using artificial immune system and extreme learning machine hybrid approach. In: 2020 IEEE 6th World Forum on Internet of Things (WF-IoT). IEEE; 2020.
12. Krivoshein B.N., Pokrovsky I.A. Concepts and criteria for assessing the technological independence and security of critical information infrastructure facilities. *IT Security* 2023;30(4):39-60. (in Russ.)
13. Alekseev V.M., Chichkov S.N. Information security in intelligent mass transit management systems. *Dependability* 2022;22(3):62-68. DOI:10.21683/1729-26462022-2019-3-4-62-68 62- 68. (in Russ.)
14. Veselova V.A., Kolomoitsev V.S. An approach to detecting anomalies in a self-similar network traffic. *Dependability* 2023;23(2):57-63. DOI: 10.1007/1729-2646-2023-23-2- 57- 63. (in Russ.)
15. 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. DOI: 10.21683/1729-2646-2020-20-2-43-53.
16. Kulagin M.A., Sidorenko V.G. Evaluating the economic efficiency of preventive measures aimed at reducing the number of train control violations. *Dependability* 2022;22(4):37-44. DOI: 10.21683/1729-2646-201322-4-37. (in Russ.)
17. Loginova L.N., Kulagin M.A. Application of Jupiter Notebook Technology. Jupiter Hub for effective education in universities. *Rektor VUZa* 2021;4:32-37. (in Russ.)
18. Belouch M., Hadaj S.E., Idhammad M. A two-stage classifier approach using reptree algorithm for network intrusion detection. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications* 2017;8(6):389-394.
19. Nour M., Slay J. The evaluation of Network Anomaly Detection Systems: Statistical analysis of the UNSW-NB15 data set and the comparison with the KDD99 data set. *Information Security Journal: A Global Perspective* 2016;25(1-3):18-31.
20. Nour M., Slay J. UNSW-NB15: a comprehensive data set for network intrusion detection systems (UNSW-NB15 network data set). In: 2015 military communications and information systems conference (MilCIS). IEEE; 2015.
21. Mitchell T.M. Machine Learning. New York: McGraw Hill; 1997.

Сведения об авторах

Ниянг Папа Малик – аспирант РУТ (МИИТ), ул. Образцова, д.9, стр.9, Москва, Российская Федерация, 127994, e-mail: malickdiarra30@gmail.com

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

Niang Papa Malick, Postgraduate Student, RUT (MIIT), 9b9 Obrazcova St., Moscow, 127994, Russian Federation, e-mail: malickdiarra30@gmail.com

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

Ниянг П.М. Проведен обзор литературы по теме исследования. Выбраны и реализованы девять алгоритмов машинного обучения для определения лучшего для обнаружения вторжений в устройства IoT путем бинарной классификации.

Сидоренко В.Г. Анализ полученных результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Проблемы нормативного обеспечения функциональной надежности цифрового производства

Matters of assuring functional dependability compliance of digital manufacturing

Юркевич Е.В.^{1*}, Крюкова Л.Н.¹

Yurkevich E.V.^{1*}, Kryukova L.N.¹

¹Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова Российской академии наук, Российская Федерация, Москва

¹V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, Moscow

*79163188677@yandex.ru



Юркевич Е.В.



Крюкова Л.Н.

Резюме. Цель. Предложить методологический подход к обеспечению функциональной надежности производства на основе использования SMART-документов в условиях импортонезависимости технологических процессов цифрового формата. **Методы.** Развитие прикладных возможностей использования теории надежности и методов построения информационных систем определило построение методологических положений алгоритмизации применения SMART-стандартов как средств минимизации функциональных сбоев и отказов в производственных процессах. В качестве инструментов машиноинтерпретируемого представления стандартов рассмотрены цифровые модели технологических линий. Предлагаемая форма нормативных документов ориентирована на переход от машиночитаемых данных к машинопонимаемому контенту. **Результаты.** Использование предлагаемых методов систематизации контента в стандартизации производственных процессов показывает, что одним из ключевых методологических положений в обеспечении однозначности интерпретации нормативных требований является каталогизация технологических данных на основе стандартизации характеристик процессов обмена информацией в цифровой форме. В специализированных проектах часто используется не полный нормативный документ, а его отдельные положения. В этом случае для машинопонимания разрабатываемого контента предлагается использовать специальные идентификаторы, например, «абзац», «графический объект», «ячейка таблицы». Введение таких средств идентификации позволит формировать класс SMART-стандартов, собирающих в единый документ положения по обеспечению штатных результатов при разнородных средствах реализации технологического процесса. Публикации, созданные с помощью интеллектуальной обработки содержания SMART-документов, рассматриваются как контейнеры структурированных и неструктурированных данных, учитывающие условия реализации конкретного проекта. Существующая динамика спроса на современную продукцию часто определяет допустимость ее промышленного выпуска на различных предприятиях с параллельным применением уникальных технологий. Условия такой организации накладывает свои ограничения на сопоставимость разнородных требований к производственным процессам, поэтому представление результатов организационных, конструктивных и технологических решений предлагается унифицировать, используя термин «актив производственной системы». Введение в цифровом формате относительных оценок результатов является эффективным механизмом обеспечения согласованности управления. В этой связи повышается важность единства нормативного обеспечения как базы таких оценок. В качестве одного из решений проблемы минимизации сбоев и отказов в технологических линиях предложено создание ситуационного центра с системой поддержки принятия решений на основе данных комплекса нормативных документов с унифицированными требованиями к активам производственной системы. Опыт формирования нормативного обеспечения индустрии 4.0 дан в обзоре серий стандартов ISA на цифровые производства. Показано, что благодаря введению SMART-стандартов повышается устойчивость взаимодействия между информационными системами, повышается функциональная надежность работы технологических линий. Введение в средства машинопонимания контента положений, регламентирующих использование алгоритмов разработки, редактирования и экспертизы проектов нормативных документов, является важным фактором обеспечения функциональной надежности выпуска продукции. **Заключение.** Изложенный подход ориентирован на методологию разработки стандартов, учитывающих требования из различных предметных областей. В условиях формирования импортонезависимости производства рассмотрены возможности минимизации сбоев и отказов в технологических процессах цифрового формата вследствие использования нормативной базы, неэквивалентной положениям международных документов, и учитывающей специфику отечественных производственных систем.

Abstract. Aim. To propose a methodological approach to ensuring the functional dependability of industrial facilities using SMART documents in the context of import-independent digital processes. **Methods.** The evolving applicability of the dependability theory and information systems design has defined the methodological provisions for algorithmising the application of SMART standards for minimising functional faults and failures of industrial processes. Digital models of production lines were examined as tools for machine-recognisable representation of standards. The proposed form of regulatory documents is intended to enable the transition from machine-readable data to machine-understandable content. **Findings.** The application of the proposed methods of content systematisation in the context of manufacturing process standardisation shows that the classification of process data based on standardised characteristics of digital information exchange processes is one of the key methodological provisions ensuring unambiguous interpretation of regulatory requirements. Specialised projects often use individual provisions rather than complete regulatory documents. In this case, in order to ensure machine-understandability of the developed content, it is proposed using special identifiers, e.g., «paragraph», «graphic object», «table cell». The deployment of such identification tools will allow creating a class of SMART standards that collect into a single document the provisions regarding the delivery of intended results in situations when the operating equipment is diverse. Publications created using intelligent processing of SMART documents are considered as containers of structured and unstructured data that take into account the conditions of particular projects. The existing dynamics of the demand for advanced industrial products often determines the admissibility of its industrial production by various companies with the parallel use of unique technologies. The conditions of such an organisation impose their limitations on the comparability of various process requirements, therefore, it is proposed to harmonise the presentation of the results of managerial, design, and process engineering solutions using the term «manufacturing system asset». The introduction of relative result estimates as part of the digital format is an efficient mechanism for ensuring management consistency. In this context, the importance of a uniform regulatory framework as the foundation for such assessments is growing. As one of the ways of minimising faults and failures of industrial equipment, it is proposed to create a situation centre with a decision support system based on the regulatory data with harmonised manufacturing system asset requirements. An experience of Industry 4.0 regulation is described in the review of the ISA digital manufacturing series of standards. It was shown that the deployment of SMART standards improves the stability of interaction between information management systems and the functional dependability of production lines. The introduction of provisions regulating the use of algorithms for the development, editing, and examination of draft regulatory documents into the content machine-understandability facilities is an important factor in ensuring the functional dependability of products. **Conclusions.** The presented approach is focused on the methodology for developing standards that take into account requirements from various subject areas. In the context of ongoing import substitution in manufacturing, the paper examines the feasibility of minimizing digital process faults and failures caused by the use of regulatory frameworks that are not equivalent to the provisions of international documents and take into account the specificity of Russian industrial systems.

Ключевые слова: стандарты, цифровые производства, импортнезависимость, актив производственной системы, унификация нормативного обеспечения, функциональная надежность, устойчивость технологических процессов, ситуационный центр, индустрия 4.0, стандарты ISA.

Keywords: standards, digital manufacturing, import independence, manufacturing system asset, harmonisation of regulations, functional dependability, process sustainability, situation centre, industry 4.0, ISA standards.

Для цитирования: Юркевич Е.В., Крюкова Л.Н. Проблемы нормативного обеспечения функциональной надежности цифрового производства // Надежность. 2024. №3. С. 52-60. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-3-52-60>

For citation: Yurkevich E.V., Kryukova L.N. Matters of assuring functional dependability compliance of digital manufacturing. Dependability 2024;3:52-60. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-3-52-60>

Поступила: 26.03.2024 / **После доработки:** 22.04.2024 / **К печати:** 09.09.2024

Received on: 26.03.2024 / **Revised on:** 22.04.2024 / **For printing:** 09.09.2024

Введение

Среди важных факторов, влияющих на тенденции развития экономики России, сегодня выделяется тренд перевода промышленных процессов в цифровой формат. Комплексность автоматизации производства выявляет новые требования к средствам промышленного интернета (ПИ), киберфизическим системам (КФС), а также к технологиям искусственного интеллекта (ИИ), влияющим на работу эргатических систем [1]. В условиях формирования импортонезависимости технологических процессов повышается актуальность построения системы нормативов, влияющих на вероятность получения штатного результата работы цифрового производства. Такую вероятность предлагается считать характеристикой функциональной надежности средств и систем в технологических линиях.

При управлении производственными процессами (при сборе, накоплении (хранении), поиске, обработке или передаче информации) возможны сбои и отказы. Например, ГОСТ 27.00-2015 определяет «сбой – самоустранившийся отказ или однократный отказ, устраняемый незначительным вмешательством оператора». Другой трактовкой является «сбой – кратковременное нарушение последовательности или качества выполнения технологических операций», или «сбой – однократное нарушение логических условий работы цифрового элемента» [2]. В данной работе сбоем предлагается считать нарушение штатного функционирования программы, устройства или информационной системы в целом, которое устраняется либо повторным выполнением действия, при совершении которого возникла данная ситуация, либо перезагрузкой функционального блока. Если эти действия не помогают, такое нарушение предлагается классифицировать как отказ.

Например, к сбоям можно отнести проблемы, связанные со стабильностью работы программного обеспечения (*software*). Такие сбои «связаны» с характеристиками аппаратного обеспечения (*hardware*) информационной системы. Опасны нарушения в структуре расположения файлов и каталогов, когда ссылки на информацию, расположенные в таблице размещения файлов, указывают не на то место, где на самом деле располагается файл. Не редки сбои в программах, несовместимых с операционной системой или с аппаратным обеспечением. Например, когда несколько устройств одновременно пытаются получить доступ к одному и тому же системному ресурсу, возникает аппаратный конфликт.

В целом, одной из важных причин появления сбоев и отказов является несоблюдение разработчиком норм, определенных в технических условиях на изделие, или использование методов увеличения его производительности, не определенных в нормативных документах. Часто сбои и отказы вызываются несоблюдением условий эксплуатации, также регламентированных в нормативных документах.

Развитие информационных возможностей принципиально новых производств определило постановку

проблемы формирования норм, позволяющих регламентировать новые сочетания конструкторских, технологических и организационных решений. С целью обеспечения функциональной надежности новых технологий актуальна задача разработки нормативных документов, определяющих условия минимизации сбоев в установке, использовании и отладке унифицированных производственных линий цифрового формата.

Одним из решений такой задачи является разработка SMART-стандартов [3], которыми системы, использующие технологии ИИ, смогут руководствоваться без участия человека. Важным условием успешности такого использования может стать переход от «машиночитаемых» документов к «машинопонимаемым».

Традиционно для построения автоматических производств требуется унификация рутинных процессов, регламентируемая соответствующими нормами. Для технологий 4.0 это должны быть положения умных SMART-документов, созданных на основании интеллектуальной обработки содержания требований к объектам информационной системы как контейнерам неструктурированных и структурированных данных, учитывающим условия реализации конкретного проекта.

Разнородность таких условий накладывает свои ограничения на сопоставимость требований к производственным процессам. В этом случае результатом интеллектуальной обработки должно стать введение алгоритмов, предусматривающих адаптацию норм, определенных в таком контейнере данных, к изменяющимся условиям их использования.

В мировом сообществе широко разрабатываются проекты перевода производства на цифровые технологии, например, в Германии это «*Industrie 4.0*», во Франции – «*Industrie du Futur*», в Китае – «*Intelligent Manufacturing*» и так далее. Техническое бюро ИСО по SMART-стандартам определило мероприятия на период до 2025 года. Среди этих мероприятий изменения в требованиях к процессам разработки стандартов, изменения в системе управления стандартизацией, вопросы кибербезопасности, управления авторскими правами, обучения специалистов и др.

Уже существуют международные пилотные проекты, использующие SMART-решения, в том числе стандарты ИСО, которые разрабатываются как цифровые с нуля. Например, реестр метаданных МЭК *Common Data Dictionary (IEC CDD)* и репозиторий свойств продукции *ECLASS*. Официальным дистрибьютором переводчиком *ECLASS* в России является компания «Кодекс».

1. Методологические тенденции в регламентации средств обеспечения функциональной надежности цифрового производства

Темпы и направления технологического развития хозяйственного комплекса России часто зависят не только от решения проблем импортозамещения средств,

определяющих возможность выпуска отечественной продукции, но и от обеспечения ее импортнезависимости, то есть от выбора своего пути развития страны. В этой связи исключительную важность приобретает регламентация согласованности характеристик разнородных технологических процессов на предприятиях, выпускающих однотипную продукцию.

Анализ параметров программно-технических средств при многоаспектности организации цифрового производства определил его рассмотрение в виде многоуровневого (многослойного) развивающегося объекта. Такую модель предлагается рассматривать как представление информационной базы, с помощью которой возможно построение регулярного механизма формирования требований к изменяющимся характеристикам технологических процессов.

Системность рассмотрения производственного цикла предполагает необходимость использования нормативных документов, регламентирующих значения параметров его функциональных модулей и унификацию требований к технологиям их использования. В этой связи одной из важных задач снижения вероятности сбоев цифровых производств, является разработка норм, определяющих сопоставимость характеристик технологических модулей на функционально близких линиях вне зависимости от того, выпускаются они на одном или на разных предприятиях. К средствам, входящим в такие линии, предлагается относить материальные объекты (средства связи) и информационные средства (базы данных, базы знаний, программное обеспечение).

Современные задачи введения интеллектуальности в управление производственными процессами предполагают создание средств, адаптирующихся к нелинейным изменениям характеристик внешней среды. В этом случае требуется регламентация представления не только результатов расчета моделей, созданных технологами, но и норм многоуровневого описания информационных процессов.

С целью минимизации сбоев в таких технологиях ставится задача адаптации алгоритмов формирования их нормативного обеспечения к структуре регламентируемых процессов. Для этого предлагается использовать методологию динамического программирования [4]. Например, для управления технологической линией нормы, определяющие значения характеристик некоторого функционального блока являются результатом расчета по (отработанному!) алгоритму. Если рассмотреть такую линию в виде системы блоков, возможна обоснованность операции кэширования имеющегося алгоритма, позволяющая его вводить в регламентации характеристик для каждого функционального блока с ограничениями на сопоставимость разнородных требований к производственным процессам. Таким образом, отпадает необходимость в формировании изолированных алгоритмов нормирования значений характеристик для каждого из блоков этой системы, а унификация представления результатов организационных, конструктивных и технологических решений определит повы-

шение эффективность использования нормативного обеспечения в масштабе всей линии.

Для реализации технологий кэширования на основе обобщенного представления различных модулей предлагается использовать характеристики активов, определенных в стандартах на цифровые производства, например, в ГОСТ Р 59799-2021 [5]. В качестве унифицированного термина, обозначающего эти характеристики, предлагается «актив производственной системы» (актив ПС).

Данный термин обобщает характеристики объектов, для которых параметры технологических решений и организационных механизмов влияют на разработку, производство и эксплуатацию разнородных изделий или систем. Сходное понимание активов ПС дает стандарт МЭК 62832-1:2020 [6], определяющий их как «устройства (или их части), электронные модули, системы, программы, машины, установки, сети, услуги, концепции и идеи, планы, архивы».

Например, IEC/PAS 63088 (2017) «Интеллектуальное производство. Модель эталонной архитектуры *industry 4.0*» (*Smart manufacturing – Reference architecture model industry 4.0 RAMI 4.0*) рассматривает этот термин в представлении параметров программно-технического обеспечения КФС. В цифровом представлении ГОСТ Р 70265.1-2022 [7] однозначно определяет актив ПС как идентификатор роли (для информации об оборудовании, обусловленном ролью, – ролевом оборудовании), и как серийный номер (для информации о физических активах).

В стандартизации минимальной единицей информации, к которой применяются какие-либо действия, традиционно принято рассматривать нормативный документ. В то время как его пользователи часто руководствуются только отдельными требованиями и, соответственно, отслеживают жизненный цикл именно этих требований, «связывая» используемые и дополнительные данные не с документом, а с его отдельными нормами, определенными в конкретном месте документа. Такая практика работы с нормативными документами предполагает рациональность разметки полнотекстового формата *SMART*-стандарта [1] идентификаторами абзаца (*PID*), дающими возможность введения его машинопониманием.

Будем полагать, что при построении нормативного документа формируется свой *PID*, учитывающий один из типов каждой сущности: «абзац», «графический объект» и «ячейка таблицы». В этом случае минимальный объем требования составит 1 абзац, 1 рисунок или 1 ячейка таблицы. Верхняя граница объема при этом может не указываться, если технологически допустимо, что требование относится к неопределенному количеству абзацев, рисунков и табличных ячеек из любого места документа.

Практически текст требований часто располагается в основной части документа, а относящиеся к нему числовые данные и иллюстрации – в приложениях. Введение норм установки *PID* позволит с помощью *SMART*-документа собирать требования к разнородным средствам реализации технологических процессов в единую логическую сущность.

В связи с тем, что современные производства в основном являются эргатическими системами, активы ПС возможно рассматривать как элементы социо-киберфизической системы (СКФС) [8]. Такое понимание включает в себя сочетание характеристик технологий принятия экспертных решений с учетом человеческого фактора и характеристик производства, согласно данным баз знаний, сформированных средствами искусственного интеллекта.

Специфика появления сбоев в применении активов СКФС в основном обусловлена такими видами технологий, как использование и обслуживание. Использование определяется факторами, воздействие которых ограничено необходимыми и достаточными условиями ведения технологических процессов. Примером возможности учета физических и технологических особенностей актива является представление функционального модуля в виде цифрового двойника [9]. Необходимым условием надежности использования активов СКФС является соответствие значений параметров, входящих в такую модель, положениям нормативных документов, определяющих конструктивные характеристики данного актива. Аналогично, необходимым условием надежности обслуживания активов СКФС является обеспечение соответствия значений параметров положениям нормативных документов, определяющих сохранение их функциональности. Часто цифровой формат обслуживания можно рассматривать как совершенствование активов СКФС, в то время как традиционно обслуживание предполагает просто сохранение статуса актива при использовании.

Положения ГОСТ Р 59799-2021 «Умное производство. Модель эталонной архитектуры индустрии 4.0», определяют нормы связей между компонентами цифрового производства на основе информации в самом активе либо в ИТ-системе. Важным достоинством такой регламентации должна стать возможность расширения функциональности активов за рамки простой идентификации в информационной системе. Если функции администрирования заключены в активе ПС, то сформировать наиболее рациональную схему выполнения технологических задач позволит его цифровой двойник. В этом случае актив ПС можно рассматривать как диспетчер компонентов СКФС.

Согласно ГОСТ Р 59799-2021 нормативное обеспечение актива ПС предлагается формировать на основе концептуальных уровней, показанных на рис. 1.

Анализ функциональных задач, показанных на рис. 1, позволяет выделить обеспечение коммуникационных возможностей и технической функциональности активов ПС как наиболее важные тренды развития цифровых производств. В то же время, активы, описывающие сервисы и технологии с программным обеспечением соответствующего компонента, часто используют различные протоколы связи [10, 11]. С целью минимизации функциональных сбоев и отказов эти протоколы и приложения должны соответствовать нормам, определенным в стандартах, обеспечивающих регулярность акту-

ализации информации и поддержку принятия решений по управлению производственными процессами.

Существующая динамика спроса на современную продукцию часто определяет допустимость ее промышленного выпуска на различных предприятиях с параллельным применением уникальных технологий. Условия такой организации накладывают свои ограничения на сопоставимость разнородных требований к производственным процессам. Для обеспечения согласованности представления результатов организационных, конструктивных и технологических решений предлагается вводить в цифровой формат относительные оценки этих результатов. В этой связи повышается важность единства нормативного обеспечения как базы таких оценок.

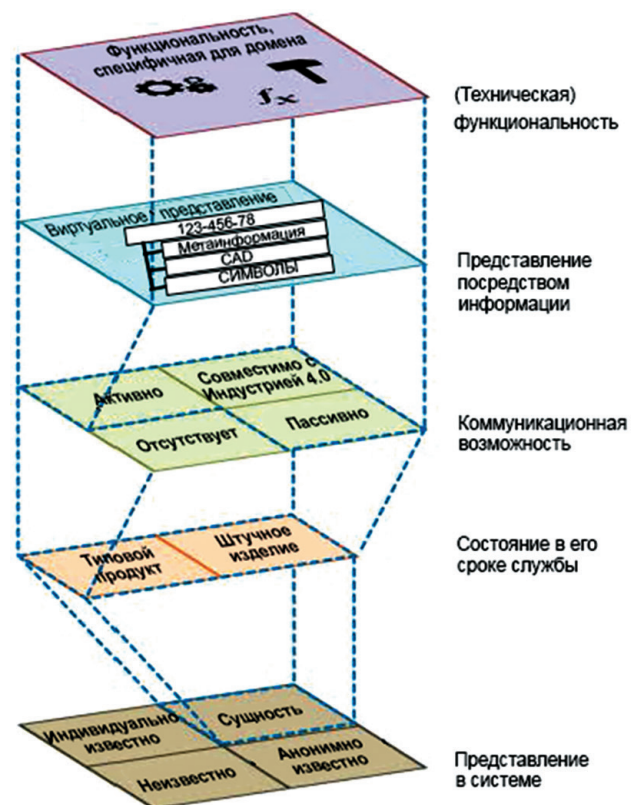


Рис. 1. Концептуальные уровни актива ПС

В качестве одного из решений проблемы минимизации сбоев и отказов в технологических линиях предложено создание ситуационного центра с системой поддержки принятия решений на данных комплексов нормативных документов с унифицированными требованиями к активам ПС. Визуализация данных SMART-стандартов на приборной панели такого центра поможет их воспринимать, сопоставлять и анализировать, обеспечивая устойчивость взаимодействия между информационными системами и функциональную надежность работы технологических линий.

С помощью ситуационного центра возможен контроль доступа к документам на уровне регламентируемого набора данных, а также, используя методологию динамического программирования [4], автоматически преоб-

разовывать эти данные в единый формат, устанавливая связи между таблицами. Унификация представления базы данных, основанная на положениях нормативных документов с требованиями к представлению активов ПС, упростит принятие соответствующих решений.

Примерами регламентируемых требований, контролируемых ситуационным центром, являются: диапазон частот для продуктивной коммуникации с помощью информационных каналов в реальном масштабе времени; предельные значения отказоустойчивости активов ПС, определяющих надежность (безопасность) производственных процессов при воздействиях факторов внешней среды; характеристики сетей и интерфейсов на основе единых правил; точность тактовой синхронизации в построении алгоритмов транзакций; регламентация ограничений в установлении специальных связей и другие.

В связи с разнородностью поступающей информации в структуре ситуационного центра предлагается использовать маршрутизатор, определяющий рациональные каналы передачи информации. С целью минимизации ошибок администратор может просматривать параметры нормативных ссылок, направляя деятельность разработчиков. Например, таким приложением может явиться техническая ИТ-служба с поддержкой *SPARQL*.

Диспетчер компонентов должен на основе технологий искусственного интеллекта формировать расширенный сервис, который призван выполнять постоянную актуализацию содержащейся информации, а также предоставление запросов, основанных на сервис-ориентированной архитектуре (*SOA*). Так, для обеспечения внешнего доступа к представлению информации и технической функциональности актива требуется регламентация связей между ИТ-техникой базовой платформы и сервисом ее целевой платформы.

Важным фактором согласованности цифровых производств функционально близких модулей на различных предприятиях является наличие в нормативных документах положений, обеспечивающих возможность считывать состояние активов ПС каждым из производителей этих модулей [12]. Следовательно, ставится задача унификации моделей технологических процессов, включающих в себя данные о динамике состояний активов ПС и их функциональности. На основании такой информации должен формироваться статистически обоснованный анализ данных. Например, с помощью последовательных запросов о состоянии конкретного актива цифрового производства в определенный момент времени.

В регламентации цифровых производственных процессов весьма существенным является введение в *SMART*-стандарты норм, определяющих поддержку просмотра документов, толерантный поиск информации по синонимам и поиск сходства отношений. Обладая возможностями идентификации активов, диспетчер компонентов ситуационного центра сможет подключать *SOA* или интегрировать оболочку в хранилище. Кроме того, основанный на *SOA* диспетчер компонентов сможет предоставлять *API* мощных сервисов для более широких запросов информации об активе [5].

2. Примеры стандартов контроля работы серийных предприятий как активов ПС базы данных ситуационного центра

1. *Регламентация контроля процесса производства* является областью разработок Комитета по стандартам контроля серий *ISA-88* как ведущей организации в отношении контроля работы серийных предприятий. Комитет отвечает за разработку и ведение стандарта серии *ISA-88*, на международном уровне стандарт *ISA-88* известен как *IEC 61512*, который поддерживается Подкомитетом *65A IEC*.

Одной из ведущих в создании серии стандартов *ISA-88 Batch Control System* является компания *Yokogawa*. Продуктами ее разработки являются: Модели и терминология *ISA-88* (Часть 1); Структуры данных и руководство по языковому контролю *ISA-88* (Часть 2); Общие и местные модели и представление *ISA-88* (Часть 3); Досье на производство (Часть 4). Языком пакетной разметки (*BatchML*) является *XML*, определяющий реализацию семейства стандартов *ISA-88*. Он состоит из набора *XML*-схем, написанных с использованием языка *XML*-схем (*XSD*) Консорциума *Internet*, которые реализуют модели и терминологию в стандартах *ISA-88*.

2. *Нормы интеграции системы управления предприятием* содержатся в разработках Комитета по стандартам *ISA-95*. Они определяют основу для обмена производственными данными между предприятиями и производственными системами, а также между системами управления производственными операциями (*MOM*). Такие стандарты используются компаниями-производителями при построении непрерывных, периодических и дискретных производств, а также поставщиками систем на уровне *MOM* и предприятий.

Стандарты *ISA-95* базируются в США, признаны на международном уровне в качестве стандарта *IEC/ISO 62264*. Они состоят из пяти частей: Части 1 и 2 определяют рамки для обмена данными между системами управления производственными операциями предприятия и управления производственными операциями. Часть 3 определяет деятельность по управлению производственными операциями и используется производственными компаниями для описания их требований и функций *MOM*. Часть 4 определяет модели обмена данными между функциями в пределах уровня *MOM*. Часть 5 в качестве программных транзакций определяет алгоритм автоматизированного обмена данными из частей 1 и 2.

Международная версия *ISA-95 – IEC/ISO 62264* разработана Совместной рабочей группой 5 *IEC (JWG 5)*. Участие МЭК в работе Совместной рабочей группы 5 осуществлялось под эгидой Подкомитета 65 (ПК 65) Технического комитета 65 (ТК 65). Участие ИСО обеспечивается Совместной рабочей группой 5 в рамках Подкомитета 5 Технического комитета 184. В соответствии с публикациями *ISA-95* США он представляется на рассмотрение *JWG 5* в качестве международного стандарта. Участие в *JWG 5* координируется через национальную стандартную организацию каждой страны-члена.

3. *Нормы по обеспечению кибербезопасности промышленных систем автоматизации и управления* содержатся в разработках Комитета по стандартам *ISA-99 (IEC 62443)*. Они регламентируются многокомпонентной группой стандартов и связанных с ними технических отчетов. Стандарты сгруппированы по четырем широким областям: понятия и терминология; создание и поддержание программы безопасности специально для владельца актива; безопасная интеграция систем управления, включая модель зоны и канала; разработка продукции и технические требования к системам управления.

4. *Нормы работы с человеко-машинными интерфейсами (ЧМИ)* содержатся в разработках Комитета по стандартам *ISA-101*. Они регламентируются стандартами и техническими докладами, которые в настоящее время переводятся на формат *IEC*. Нормы касаются проектирования, внедрения, использования и/или управления человеко-машинными интерфейсами в производственных приложениях.

Области, охватываемые работой *ISA-101*, включают в себя такие аспекты проектирования и работы ЧМИ как: иерархии меню, соглашения о навигации по экранам, графические и цветовые соглашения, динамические элементы, соглашения об аварийных сигналах, методы безопасности и атрибуты электронной подписи, интерфейсы с фоновым программированием и историческими базами данных, всплывающие соглашения, справочные экраны и методы, используемые для работы с аварийными сигналами, интерфейсы программных объектов и интерфейсы конфигурации с базами данных, серверами и сетями.

5. *Нормы работы с системными аспектами этапов жизненного цикла (проектирование, реализация и эксплуатация)* содержатся в разработках Комитета по стандартам *ISA-101*. Они ведутся под руководством отраслевых экспертов от соответствующих членов комитета. Разрабатываются нормы общих положений, определяются области применения, даются нормативные ссылки, определяются термины и сокращения, формируются алгоритмы управления системой ЧМИ, а также регламентируются нормы использования человеческого фактора, даются стили дисплея и, нормы взаимодействия с пользователем. В технических отчетах приводится философия ЧМИ для перспективных разработок, в том числе определяются стили ЧМИ, механизмы их проектирования, оценивается удобство и производительность, формируется спецификация покупки ЧМИ.

6. *Регламентация работы с интерфейсом полевого устройства* содержится в разработках Комитета по стандартам *ISA-103 (IEC 62453)*. Они определяют требования к формированию интерфейсов как для вертикального, так и для горизонтального потока данных, а также к управлению функциями и доступа к данным, в рамках архитектуры клиент-сервера. Такой подход позволяет прикладному программному обеспечению и инструментам конфигурации использовать унифицированные алгоритмы взаимодействия с полевыми устройствами, учитывающими специфику каждого производителя. *ISA-103* поддерживает

программное обеспечение для полевых шин, устройств или подсистем, которое может быть интегрировано как часть универсального инструмента управления жизненным циклом системы автоматизации предприятия.

Например, в рамках деятельности *ISA-103 Yokogawa* предлагает такие продукты как *Plant Resource Manager (PRM)* и *FieldMate*, а также полевые приборы на основе полевой шины *HART®*, *FOUNDATION™*, *PROFIBUS®* и *ISA100.11a* имеют *DTM (Device Type Manager)*. В перспективе Комитет по *ISA-103* предполагает пересмотр сферы охвата *ISA-103* для поддержки *FDI* и обновление *ISA 62453* в рамках цикла технического обслуживания.

7. *Язык описания электронных устройств (EDDL)* определен стандартом *ISA-104*, т.е. документом МЭК (*IEC 61804*), регламентирующим встроенную технологию для полевых цифровых протоколов, позволяющую конфигурировать/настраивать, диагностировать и контролировать устройства различных производителей.

EDDL – текстовый язык для описания характеристик цифровой связи сложных полевых КИП и параметров оборудования: состояние устройства, диагностические данные и детали конфигурации. Комитет по *ISA-104* поддерживает веб-сайт для *EDDL*.

В настоящее время комитет работает над новой структурой стандартов серии *IEC 61804*, оценкой ее влияния на интеграцию полевых устройств и изменением области применения и цели *ISA 104*, включив в нее *FDI*. Применение стандартов *ISA-104* определило эффективность разработки полевых измерительных приборов (*Yokogawa*), где использованы такие протоколы как *HART®*, *FOUNDATION™*, *fieldbus*, *PROFIBUS®* и *ISA100.11a*.

8. *Стандартизация в системах автоматизации непрерывных технологических операций* определяется продуктами Комитета по стандартам *ISA-106*, являющимися нормативными документами, которые регламентируют работу активов ПС автоматизации процедур в непрерывных технологических отраслях [8].

9. *Стандарты, связанные с практикой и рабочими процессами для проектирования, эксплуатации и использования диагностической и другой информации, предоставляемой интеллектуальными полевыми устройствами в технологических отраслях*, являются результатами разработок Комитета по *ISA-108*.

Стандарты, регламентирующие управление системами сигнализации в технологических отраслях, разработаны Комитетом по *ISA-18.2*. В них приведены требования и рекомендации для деятельности жизненного цикла системы управления аварийными сигналами. Определенные в этих документах этапы жизненного цикла включают в себя философию, идентификацию, рационализацию, рабочее проектирование, внедрение, эксплуатацию, техническое обслуживание, мониторинг и оценку, управление изменениями и аудит.

В настоящее время опубликованы технические доклады: Основные принципы сигнализации; Идентификация и рационализация аварийных сигналов; Базовая конструкция сигнализации; Усовершенствованные и расширен-

ные методы сигнализации; Мониторинг, оценка и аудит аварийных сигналов; Проектирование сигнализации для пакетных и дискретных процессов. Эти нормативные документы поддерживаются продуктами *Yokogawa* как консолидированное программное обеспечение для управления аварийными сигналами (*CAMS*) в составе российской платформы *Centum VP*, а также отчеты и анализ аварийных сигналов (*ARA*), содержащий главную базу данных аварийных сигналов (*AMD*) и расширенный администратор аварийных сигналов (*AAA Suite*).

10. *Стандартизированный подход к управлению пакетными процессами* содержится в разработках Комитета *ISA-88 Batch*. Им определены нормы соответствующих стандартов *ISA-88* (МЭК 61512) и использование стандартного подхода в проектах по унификации архитектуры для разработки схем управления пакетным производственным процессом. Такие работы позволяют снижать затраты на мониторинг появления сбоев при эксплуатации пакетных процессов и сокращая время, необходимое для внедрения проблем нормативного обеспечения цифровых производств новых продуктов по внедрению пакетного контроля.

Заключение

Анализ проблем формирования импортнезависимости цифровых технологических процессов позволяет определять существенные положения методологического подхода к обеспечению функциональной надежности производства. Результаты применения *SMART*-документов выявили важность их использования как фактора снижения вероятности сбоев в работе технологических линий. При этом введение *SMART*-стандартов в основу построения производств повышает их эффективность в соответствии с обеспечением новых требований неэквивалентных положениям международных стандартов.

Комплексность автоматизации производственных процессов показала актуальность регламентации интерфейсов, определяющих взаимосвязи между участками технологических линий. Так, одним из примеров необходимости предлагаемого подхода к стандартизации в цифровых производствах является важность машинной интерпретации норм, определяющих работу технологических линий, где обмен данными об их характеристиках между участками и системами данных, а также между системами управления (электрическими, измерительными и техническими средствами контроля) сможет осуществляться только при строгом определении подлежащей обмену информации и порядка ее использования.

Важным фактором обеспечения функциональной надежности производства является введение в средства машинопонимаемости контента положений, регламентирующих использование алгоритмов разработки, редактирования и экспертизы проектов нормативных документов. Для обеспечения сопоставимости требований к производственным процессам предлагаемое использование термина «актив ПС», позволяет уни-

фицировать форму представления организационных, конструктивных и технологических решений.

Особенностью применения цифровых технологий является возможность повышения эффективности производства на основе организации параллельного выпуска однородной продукции на различных предприятиях. В этой связи анализ использования *SMART*-стандартов обусловил важность ориентации на единство норм, регламентирующих применяемые технологии выпуска средств близкого назначения. Такой подход определил методологические аспекты введения сопоставимости требований из различных предметных областей. В результате алгоритмизацию применения *SMART*-стандартов предлагается рассматривать как существенную тенденцию в построении нормативных документов с регламентацией свойств производственных процессов на основе их систематизации и каталогизации.

В качестве одного из решений проблемы минимизации сбоев и отказов в производственных линиях на различных предприятиях предлагается создание ситуационного центра, база данных которого содержит комплекс нормативных документов с унифицированными требованиями к активам ПС.

Опыт формирования нормативного обеспечения индустрии 4.0 показывает, что устойчивость взаимодействия между элементами информационных систем является важным фактором повышения их функциональной надежности. Обзор применения стандартов *ISA* на цифровые производства подтверждает действенность введения *SMART*-стандартов как механизма получения штатного результата работы технологических линий.

Библиографический список

1. Гольдштейн Б.С., Ехриель И.М., Рерле Р.Д. Интеллектуальные сети. М.: Радио и связь, 2000. 489 с.
2. Шубинский И.Б. Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа. М.: Журнал «Надежность», 2012. 296 с.
3. МЭК 62890:2020 Измерение, управление и автоматизация промышленного процесса. Управление жизненным циклом для систем и компонентов (*Industrial-process measurement, control and automation – Life-cycle management for systems and components*).
4. Кормен Т., Лейзерсон Ч., Ривест Р. Алгоритмы: построение и анализ. Динамическое программирование (*Introduction to Algorithms*) / Под ред. И.В. Красикова: 2-е изд. М.: Вильямс, 2005. 1296 с.
5. ГОСТ Р 59799-2021 Умное производство. Модель эталонной архитектуры индустрии 4.0 (RAMI 4.0). М.: Российский институт стандартизации, 2021. V, 29 с.
6. МЭК 62832-1:2020 Измерение, управление и автоматизация промышленного процесса. Структура цифровых фабрик (умного производства). Часть 1. Основные принципы (*Industrial-process measurement, control and automation – Digital factory framework – Part 1: General principles*).

7. ГОСТ Р 70265.1-2022 Измерение, управление и автоматизация промышленного процесса. Структура цифровой фабрики. Часть 1. Основные положения. М.: Российский институт стандартизации, 2022. V, 30 с.

8. Yurkevich E.V., Stepanovskaya I.A., Kryukova L.N. Mechanisms of information support for the digital transformation of space complexes based on the concept of socio-cyber-physical self-organization / 5th International Scientific Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI 2021, Sochi) / Lecture Notes in Networks and Systems. Cham: Springer. 2022. Vol. 330. Pp. 629-637. DOI: 10.1007/978-3-030-87178-9_62

9. ГОСТ Р 57700.37-2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. М.: Российский институт стандартизации, 2021. IV, 10 с.

10. Р 50.1.028-2001 Рекомендации по стандартизации. «Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования».

11. МЭК 61360-1:2017 Стандартные типы элементов данных с ассоциированной схемой классификации. Часть 1. Определения. Принципы и методы (*Standard data element types with associated classification scheme – Part 1: Definitions – Principles and methods*).

12. Петухов О.А., Коропеевский Д.А. Стандартизация как элемент ускорения цифровизации и развития российской радиоэлектронной промышленности // Стандарты и качество. 2021. № 4. С. 44-47.

References

1. Goldstein B.S., Ekriel I.M., Rerle R.D. [Intelligent networks]. Moscow: Radio i sviaz; 2000. (in Russ.)

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

3. IEC 62890:2020. Industrial-process measurement, control and automation – Life-cycle-management for systems and components.

4. Cormen T., Leiserson C., Rivest R. Krasikov I.V., editor. Introduction to algorithms. 2-nd edition. Moscow: Viliams; 2005.

5. GOST R 59799-2021. Smart manufacturing. Reference architecture model industry 4.0 (RAMI4.0). Moscow: Rossiysky institut standartizatsii; 2021. (in Russ.)

6. IEC 62832-1:2020. Industrial-process measurement, control and automation – Digital factory framework – Part 1: General principles.

7. GOST R 70265.1-2022. Industrial-process measurement, control and automation. Digital factory framework. Part 1. Basic provisions. Moscow: Rossiysky institut standartizatsii; 2022. (in Russ.)

8. Yurkevich E.V., Stepanovskaya I.A., Kryukova L.N. Mechanisms of information support for the digital transformation of space complexes based on the concept of socio-cyber-physical self-organization. In: 5th International Sci-

entific Conference on Intelligent Information Technologies for Industry (IITI 2021, Sochi). Lecture Notes in Networks and Systems. Cham: Springer; 2022. Vol. 330. Pp. 629-637. DOI: 10.1007/978-3-030-87178-9_62.

9. GOST R 57700.37-2021. Computer models and simulation. Digital twins of products. General provisions. Moscow: Rossiysky institut standartizatsii; 2021. (in Russ.)

10. R 50.1.028-2001. Recommendations for standardisation. Continuous acquisition and life-cycle support. Methodology of functional modelling.

11. IEC 61360-1:2017. Standard data element types with associated classification scheme – Part 1: Definitions – Principles and methods.

12. Petukhov O., Korolevskiy D. Standardization as a tool for accelerating digitalization and development of the Russian radio-electronic industry. *Standards and Quality* 2021;4:44-47. (in Russ.)

Сведения об авторах

Юркевич Евгений Владимирович – д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ИПУ РАН специалист в области функциональной надежности и системного анализа. Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова Российской академии наук, Российская Федерация, Москва, e-mail: 79163188677@yandex.ru

Крюкова Лидия Николаевна – научный сотрудник ИПУ РАН, специалист в области стандартизации средств и систем автоматизации технологических процессов. Институт проблем управления имени В.А. Трапезникова Российской академии наук, Российская Федерация, Москва

About the authors

Evgeny V. Yurkevich, Doctor of Engineering, Professor, Head Researcher, ICS RAS, expert in functional dependability and systems analysis. V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, Moscow, e-mail: 79163188677@yandex.ru.

Lidia N. Kryukova, Researcher, ICS RAS, expert in standardisation of process automation equipment and systems. V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, Moscow.

Вклад авторов

Юркевич Е.В. предложил подход к унификации нормативной базы отечественного производства при формировании импортнезависимости технологических процессов.

Крюкова Л.Н. на примерах применения международных стандартов показала особенности использования SMART-документов в обеспечении функциональной надежности технологических линий цифрового формата.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Влияние низкоинтенсивного облучения на быстродействие КМОП микросхем

The effect of low-intensity radiation on the speed of CMOS microcircuits

Кузьмина А.В.¹, Попов В.Д.^{2*}
Kuzminova A.V.¹, Popov V.D.^{2*}

^{1,2}Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Российская Федерация, Москва, НИЯУ МИФИ

^{1,2}National Research Nuclear University (MEPhI), Russian Federation, Moscow

¹AVKuzminova@mephi.ru

^{2*}wdpopov@mail.ru



Кузьмина А.В.



Попов В.Д.

Резюме. Цель. Проведен анализ процессов деградации КМОП микросхем при воздействии ионизирующего излучения, в котором рассмотрены три процесса дефектообразования в МОП структуре на границе Si-SiO₂. **Методы.** На примере тестовых логических элементов проанализирована зависимость времени условного отказа по быстродействию от мощности дозы гамма-излучения. **Результаты.** Определен критический дефект на границе Si-SiO₂. **Заключение.** Предлагаемый в статье подход позволяет определить причины отказа КМОП микросхем. Представлен результат расчета времени отказа для трех значений мощности дозы.

Abstract. Aim. The degradation of CMOS microcircuits exposed to ionizing radiation was analysed. Three MOS defect formation processes at the Si-SiO₂ boundary were examined. **Methods.** Using the example of test logic elements, the dependence of the time of conditional speed failure on the gamma dose rate was analysed. **Findings.** A critical defect at the Si-SiO₂ boundary was identified. **Conclusions.** The approach proposed in the paper allows identifying the causes of CMOS microcircuit failures. Calculated failure times for three dose rates are presented.

Ключевые слова: МОП транзистор, образование поверхностных дефектов, ионизирующее излучение, время переключения логического элемента, прогнозирование отказов, быстродействие логического элемента

Keywords: MOS transistor, formation of surface defects, ionising radiation, gate time, failure prediction, gate speed.

Для цитирования: Кузьмина А.В., Попов В.Д. Влияние низкоинтенсивного облучения на быстродействие КМОП микросхем // Надежность. 2024. №3. С. 61-66. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-3-61-66>

For citation: Kuzminova A.V., Popov V.D. The effect of low-intensity radiation on the speed of CMOS microcircuits. Dependability 2024;3:61-66. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2024-24-3-61-66>

Поступила: 07.05.2024 / **После доработки:** 15.05.2024 / **К печати:** 09.09.2024

Received on: 07.05.2024 / **Revised on:** 15.05.2024 / **For printing:** 09.09.2024

Введение

В данной работе рассматриваются кремниевые микросхемы с МОП транзисторами (МОПТ). Эти микросхемы широко применяются в космической технике, в которой они подвергаются воздействию ионизирующего излучения (ИИ) космического пространства. При воздействии ИИ в МОПТ происходит образование дефектов и их зарядка. При этом различают дефекты в объеме оксидной пленки (объемные дефекты), на границе раздела с кремнием (поверхностные состояния) и в приповерхностной области кремния (приповерхностные дефекты). Все эти дефекты изменяют характеристики МОПТ, что в дальнейшем приводит к отказам.

Объемные дефекты оксидной пленки заряжаются при облучении. Накопленный заряд Q_{oi} со временем насыщается. Он изменяет пороговое напряжение МОПТ $U_{пор}$. Однако при длительном низкоинтенсивном воздействии ИИ наблюдается уменьшение этого заряда [1] вследствие эмиссии электронов из полупроводника или поликремниевого затвора, которое показано на рис. 1. Поэтому основной вклад в ухудшение работоспособности МОПТ при низкоинтенсивном облучении ИИ является изменение плотности поверхностных дефектов.

Поверхностные дефекты являются следствием проявления оборванных валентных связей N_{SB} в приповерхностной области кремния [2] и на границе раз-

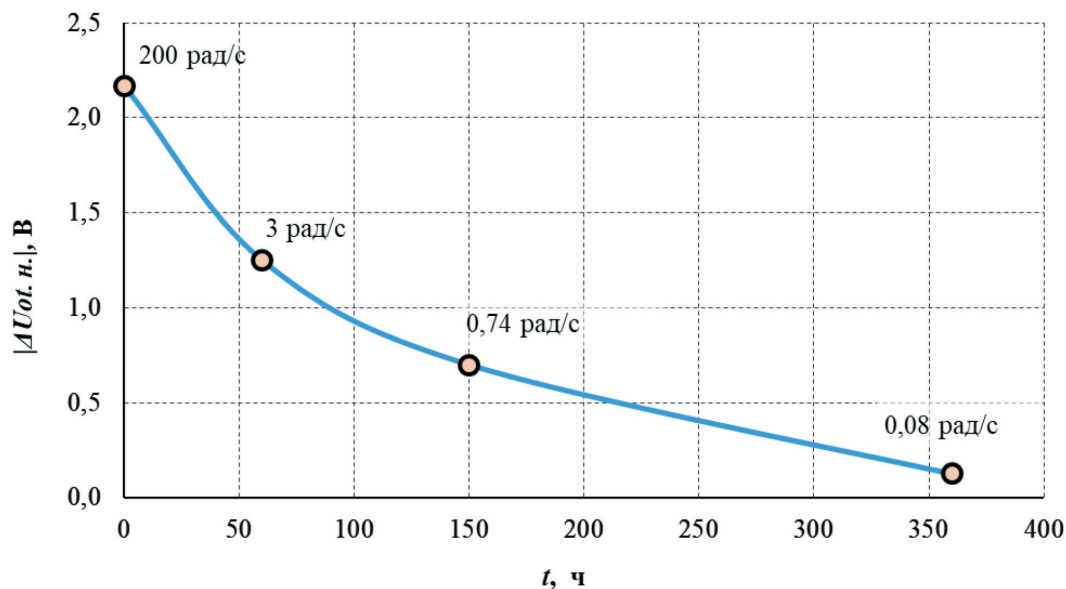


Рис. 1. Изменение насыщенного накопленного заряда $Q_{от}$ во время облучения при разных мощностях дозы ИИ

дела $Si-SiO_2$ (поверхностные центры P_{b0} и P_{b1}) [3]. Все эти поверхностные дефекты дают основной вклад в изменение параметров МОПТ, что приводит уменьшению быстродействия логических элементов. Однако все эти поверхностные дефекты при воздействии ИИ дают вклад в изменение параметров МОПТ в разное время [4].

При этом ухудшается крутизна вольт-амперной характеристики (ВАХ) МОПТ, что приводит к уменьшению быстродействия логических элементов.

Целью данной работы является уточнение причины снижения быстродействия логического элемента в КМОП интегральных микросхемах (ИМС) в разных условиях низкоинтенсивного облучения ИИ.

1. Описание эксперимента

В экспериментальном исследовании использовались КМОП логические элементы (ЛЭ) 2И-НЕ и проводилось измерение стоко-затворных ВАХ с помощью анализатора полупроводниковых приборов Agilent Technologies B1500A.

Измерения осуществлялись до и после каждого этапа эксперимента при проведении измерений. На выводе питания поддерживалось напряжение 5 В, а на затвор подавалось напряжение в диапазоне от 0 до 5 В с шагом в 100 мВ. Когда измерялась ВАХ одного ЛЭ, то входы остальных двух ЛЭ были заземлены. Схема измерений представлена на рис. 2.

Облучение проводилось гамма-излучением от источника Cs^{137} при мощности дозы $P = 0,1$ рад/с в электрическом режиме при напряжении питания $U_d = 5$ В. Мощность дозы контролировалась прибором типа ДКС-101. Результаты измерения ВАХ при разных дозах гамма-излучения представлены на рис. 3, где приведены ВАХ МОПТ с n -каналом (левая часть графика) и с p -каналом (правая часть графика) при разных до-

зах. Поскольку наибольшие изменения наблюдались у p -канальных МОПТ, то дальнейшие расчеты производились для данных элементов.

Результаты измерений ВАХ позволили определить такие важные параметры МОПТ, как пороговое напряжение U_{op} и приведенная крутизна k_{op} . Крутизна МОПТ определяется поверхностной подвижностью носителей заряда (дырок), размерами транзистора и емкостью затвора:

$$k_{op} = \mu_{sp} \frac{z}{L_k} C_{ox}, \quad (1)$$

где μ_{sp} – поверхностная подвижность дырок; z – ширина канала транзистора; L_k – его длина; C_{ox} – удельная емкость подзатворного оксида.

При воздействии гамма-излучения возникает сдвиг порогового напряжения МОПТ ΔU_{op} . Полученные па-

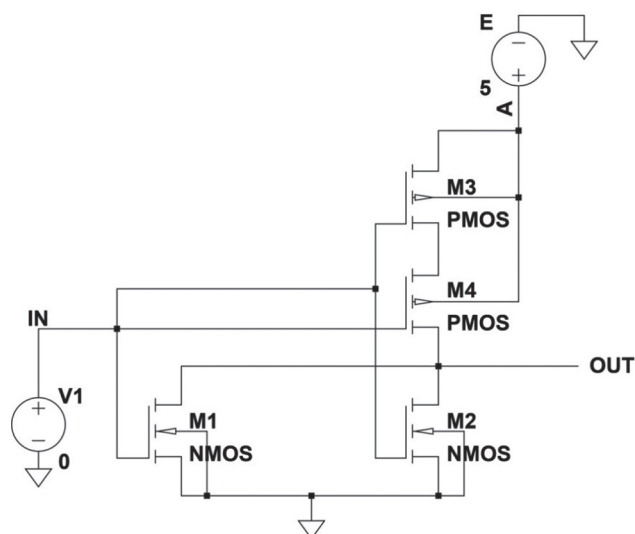


Рис. 2. Схема измерений параметров логического элемента 2И-НЕ

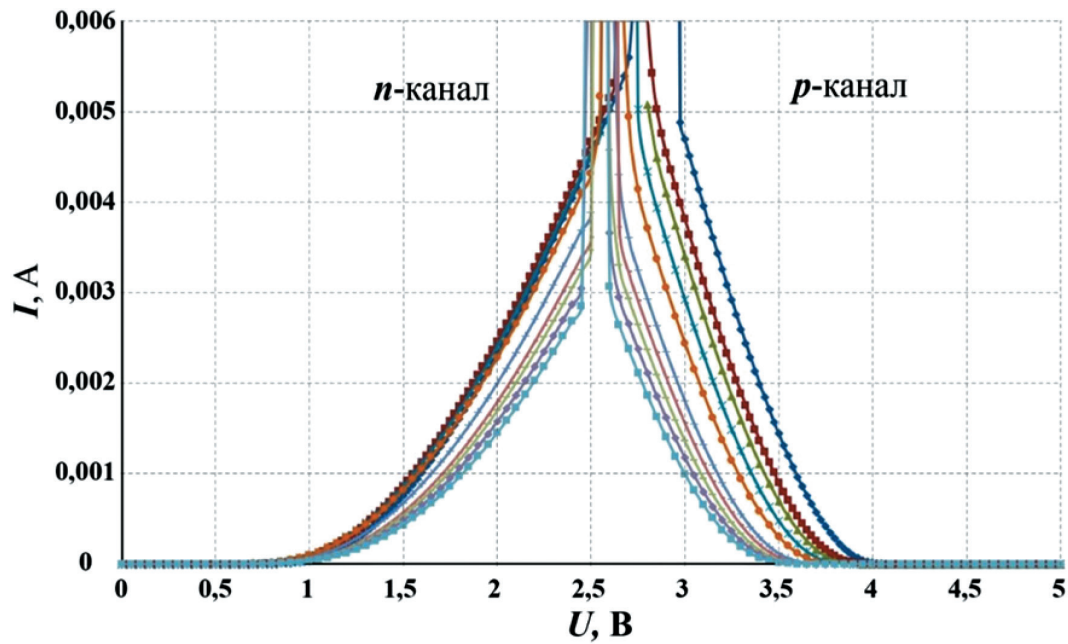


Рис. 3. Зависимость тока питания от напряжения на входах схемы И-НЕ в зависимости от времени облучения

раметры U_{0p} и μ_{sp} в зависимости от времени облучения приведены в табл. 1.

Табл. 1. Параметры моделей МОП-транзисторов в схемах 2И-НЕ

Время облучения, ч	Параметры p -канальных транзисторов	
	U_{0p} , В	μ_{sp} , $\text{см}^2/(\text{В}\cdot\text{с})$
0	-1,005	450
244	-1,153	435
583	-1,265	390
919	-1,351	370
1072	-1,386	350
1472	-1,477	300

Измерения параметров, характеризующие быстродействие, проводились для ЛЭ 2И-НЕ с использованием осциллографа типа DS03102A. Определены значения задержек при переключении ЛЭ. Результаты измерений представлены в табл. 2.

Табл. 2. Временные характеристики ЛЭ 2И-НЕ при емкости нагрузки 50 пФ

Время облучения, ч	t_3^{01} , нс	t_3^{10} , нс
0	5,55	8,72
244	6,45	8,74
583	7,59	8,76
919	8,68	8,82
1056	9,23	8,96
1472	11,01	9,51

Как можно видеть, наибольшая задержка наблюдалась при переключении из нуля в единицу, t_3^{01} . Задержка

переключения из единицы в ноль, t_3^{10} , практически не изменяется. Поэтому в данной работе принято за критическое значение задержки распространения сигнала $t_3^{01} = 10$ нс. Таким образом, при моделирующем испытании с мощностью дозы $P = 0,1$ рад/с получено время отказа $t_{от} = 1240$ ч.

2. Обработка результатов

Задержка переключения схемы 2И-НЕ может быть рассчитана по формуле [5]

$$t_{sp}^{01} = \frac{C_{\Sigma} - U_{num}}{k_{0p} (U_{num} - |U_{0p}|)^2}, \quad (2)$$

где C_{Σ} – суммарная емкость на выходе ЛЭ; U_{num} – напряжение питания ЛЭ; k_{0p} – приведенная крутизна; U_{0p} – пороговое напряжение p -канального МОПТ.

Используя значения приведенной крутизны k_{0p} , указанные в табл. 1, были определены относительные значения поверхностных подвижностей дырок как до $\mu_{sp}(0)$, так и после $\mu_{sp}(D)$ облучения гамма-лучами. Используя модель [6], были рассчитаны значения изменений плотности поверхностных дефектов (interface traps) ΔN_{it} :

$$\Delta N_{it} = \frac{\mu_{sp}(0) - \mu_{sp}(D)}{\alpha}, \quad (3)$$

где $\mu_{sp}(0)$ – поверхностная подвижность дырок в канале МОПТ при нулевой дозе; $\mu_{sp}(D)$ – поверхностная подвижность дырок в канале МОПТ при конкретном значении дозы D ; $\alpha = 7 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$ – эмпирическая константа.

Используя формулу (3), было получено изменение плотности поверхностных дефектов в p -канальных

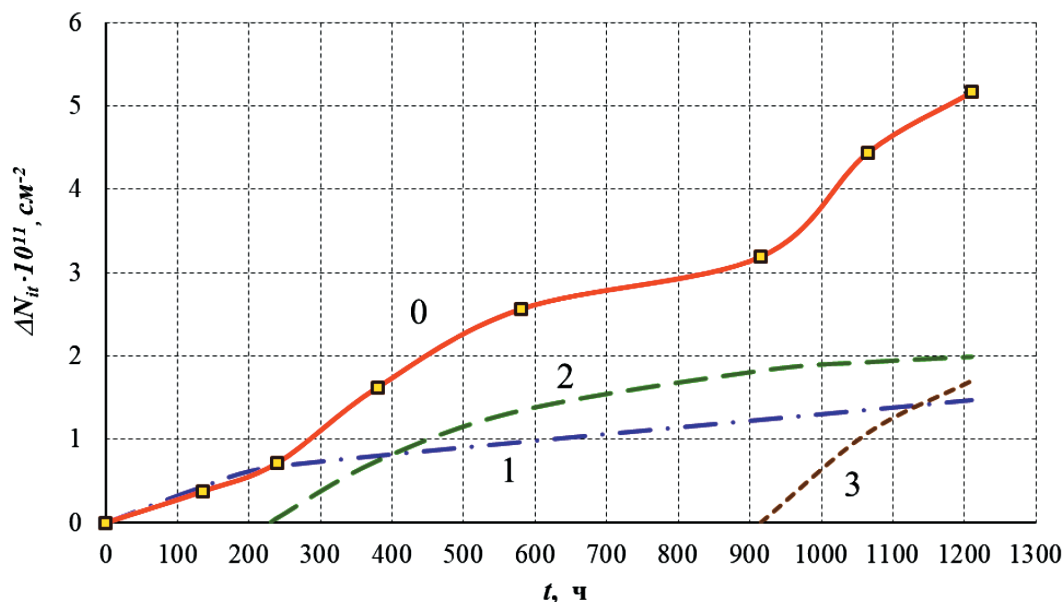


Рис. 4. Изменение плотности поверхностных дефектов ΔN_{it} в зависимости от времени облучения для p -канальных МОПТ схемы 2И-НЕ (0 – суммарная зависимость, 1, 2, 3 – зависимости на процессы дефектообразования)

МОПТ в зависимости от процессов дефектообразования, которые представлены на рис. 4.

Как можно видеть на рис. 4, дефектообразование происходит в несколько процессов дефектообразования. Анализ показывает, что функции изменения плотности поверхностных дефектов ΔN_{it} от времени облучения t представляют собой немономонную зависимость. Поэтому дальнейший анализ экспериментальных данных проводился с использованием программы *OriginLab*. Получено, что процесс поверхностного дефектообразования $\Delta N_{it}(t)$ разбивается на три экспоненциальные зависимости (кривые 1, 2, 3 на рис. 4) вида:

$$\Delta N_{it}(t) = \Delta N_{it,s} (1 - \exp(-b \cdot t)), \quad (4)$$

где $\Delta N_{it,s}$ – максимальная плотность поверхностных дефектов; b – скорость изменения плотности дефектов; t – время начала процесса дефектообразования.

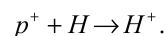
Эти зависимости отражают различные процессы поверхностного дефектообразования на границе раздела $Si-SiO_2$ и их параметры, которые представлены в табл. 3. Там же показаны и результаты статистической обработки данных.

Табл. 3. Параметры экспоненциальных зависимостей

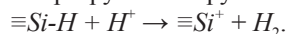
Процесс	$\Delta N_{it,s} \cdot 10^{11}, \text{см}^{-2}$	$b \cdot 10^{-3}, \text{ч}^{-1}$	R^2	$t, \text{ч}$	Вид дефекта
1	$1,558 \pm 0,061$	$2,38 \pm 0,25$	0,9945	0	ΔN_{SB}
2	$2,115 \pm 0,108$	$2,89 \pm 0,31$	0,9973	230	ΔN_{Pb0}
3	2,657	0,35	1	915	ΔN_{Pb1}

При воздействии гамма-излучения в начале облучения происходит разрыв напряженных валентных

связей между атомами кремния в приповерхностной области кремния, что вызывает рост дефектов ΔN_{SB} . В это время в объеме подзатворного диэлектрика протекает процесс образования дырок и их захват атомами водорода



Образовавшийся протон H^+ передвигается к границе $Si-SiO_2$ и вызывает разрушение группы $\equiv Si-H$ [7]



В итоге создаются поверхностные дефекты: P_{b0} -центр, а затем и P_{b1} -центр (см. табл. 3).

3. Прогнозирование отказов в реальных условиях

Процессы дефектообразования происходят во времени t и при воздействии дестабилизирующих факторов – мощности ионизирующего излучения P и температуры T . Обычно эти процессы характеризуются дозой $D = P \cdot t$. Однако такой подход не отражает изменение процессов во времени. Поэтому в данной работе предложено проведение прогнозирования отказа во времени (при условиях комнатной температуры). Для этого можно использовать формулу (4) и параметры экспоненциальных зависимостей из табл. 3 для различных процессов дефектообразования, в которых надо использовать значение реальной мощности дозы

$$b = b_0 \cdot P, \quad (5)$$

где b_0 – параметр экспоненты без воздействия ионизирующего излучения; P – мощность дозы излучения.

Использование модели поверхностного дефектообразования (4) позволило прогнозировать время отказа как в случае ускоренных испытаний при $P = 1,0$ рад/с,

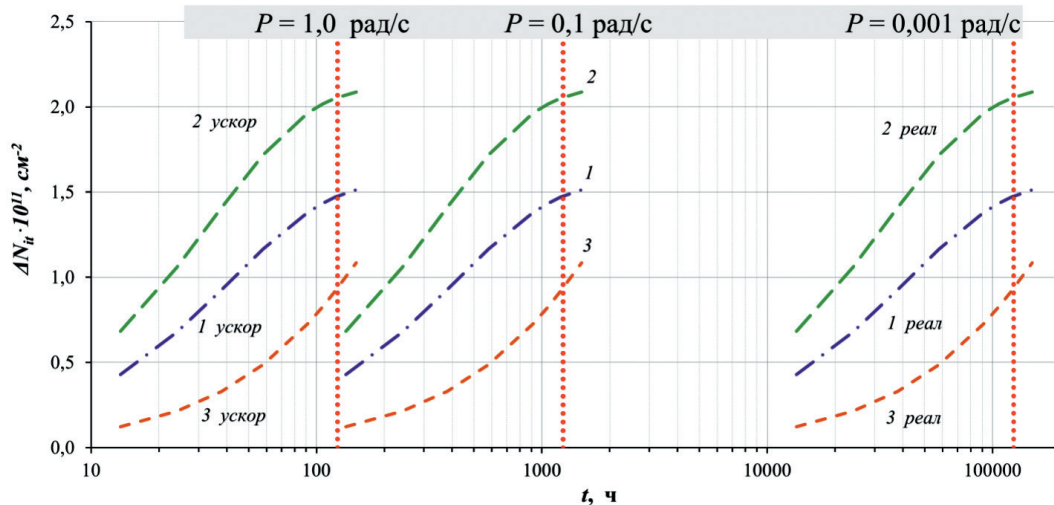


Рис. 5. Изменение плотности поверхностных дефектов от времени при различных дозах облучения и времена отказов для всех испытаний (..... – границы времен отказа)

так и в случае применения КМОП ИМС в космическом пространстве ($P = 0,001$ рад/с). Полученные зависимости представлены на рис. 5. Выявлены времена отказа (Failure) по быстродействию КМОП микросхем: $t_F = 124$ ч при $P = 1,0$ рад/с; $t_F = 1240$ ч при $P = 0,1$ рад/с; $t_F = 124000$ ч при $P = 0,001$ рад/с.

Рассчитан вклад каждого дефекта, проявляющегося на каждом процессе дефектообразования, считая суммарное изменение плотности дефектов за 100%, которого представлены в табл. 4.

Табл. 4. Доли дефектообразования при процессах

Вид дефекта	Процесс дефектообразования	Доля каждого вида дефекта, %
ΔN_{SB}	1	33
ΔN_{Pb0}	2	46
ΔN_{Pb1}	3	21

Как можно видеть, главной причиной отказа при различных видах испытаний является процесс образования дефектов типа P_{b0} -центр.

Рассчитаны величины задержки распространения сигнала t_{sp}^{01} для трех значений мощности дозы, характерные при ускоренных испытаниях ($P = 1,0$ рад/с); при моделирующих испытаниях ($P = 0,1$ рад/с) и при реальных условиях эксплуатации МОПТ в космическом пространстве ($P = 0,001$ рад/с) [7]. В случае применения КМОП ИМС в космическом пространстве при мощности дозы $P = 0,001$ рад/с получается время отказа по быстродействию $t_F = 14$ лет.

Заключение

Результаты измерений и расчетов показали, что процесс деградации КМОП ИМС имеет три составляющие, которые проявляются последовательно один за другим. Сначала происходит процесс разрыва напряженных валентных связей в приповерхностной

области кремния. Эти напряженные связи возникают из-за различия коэффициентов термического расширения кремния и оксида кремния. Затем наступают периоды освобождения оборванных связей на границе раздела $Si-SiO_2$ от пассивирующих протонов H^+ . Таким образом, возникают центры P_{b0} и P_{b1} , которые проявляются через 230 часов и через 915 часов после начала облучения ИИ. Доминирующим процессом является процесс образования центра P_{b0} . Этот дефект является критическим и приводит к отказу по быстродействию КМОП ИМС. В данном случае отказ по быстродействию при мощности дозы $P = 0,001$ рад/с ожидается через $t_F = 5167$ дней.

Библиографический список

1. Чжо Ко Вин. Применение ионизирующего излучения для ускоренных испытаний МОП интегральных схем // Электронная техника. Серия 2. Полупроводниковые приборы. 2012. Вып. 1 (228). С. 54-56.
2. Булушева М.А., Попов В.Д., Протопопов Г.А., Скородумова А.В. Физическая модель процесса старения МОП-структуры // Физика и техника полупроводников. 2010. Т. 44. Вып. 4. С. 527-532.
3. Schroder D.K., Babcock J.A. Negative bias temperature instability: Road to cross in deep submicron silicon semiconductor manufacturing // Journal of Applied Physics. 2003. V. 94. No 1. P. 1-22. DOI: 10.1063/1.1567461
4. Кузьмина А.В., Попов В.Д. Исследование поверхностного дефектообразования на границе $Si-SiO_2$ с использованием низкоинтенсивного гамма-облучения // Фламан науки. Научный журнал. 2023. № 10(10). С. 402-409. DOI: 10.37539/2949-1991.2023.10.10.017
5. Попов В.Д., Белова Г.Ф. Физические основы проектирования кремниевых интегральных микросхем в монолитном и гибридном исполнении. СПб.: Издательство «Лань», 2013. 208 с.

6. Sexton F.W., Schwank J.R. Correlation of radiation effects in transistors and integrated circuits // *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* 1985. Vol. 32. No 6. Pp. 3975-3981.

7. Алексеев И.И. и др. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / Под ред. докт. техн. наук, проф. Г.Г. Райкунова. М.: Физматлит. 2013. 358 с.

References

1. Zho Ko Wing. [Use of ionising radiation for accelerated testing of integrated MOS circuits]. *Elektronnaya tekhnika, Seria 2. Poluprovodnikovyye pribory* 2012;1(228):54-56. (in Russ.)

2. Bulusheva M.A., Popov V.D., Protopopov G.A., Skorodumova A.V. [A physical model of the ageing process of a MOS structure]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* 2010;44(4):527-532. (in Russ.)

3. Schroder D.K., Babcock J.A. Negative bias temperature instability: Road to cross in deep submicron silicon semiconductor manufacturing. *Journal of Applied Physics* 2003;94(1):1-22. DOI: 10.1063/1.1567461.

4. Kuzminova A.V., Popov V.D. [A research of surface defect formation at the Si-SiO₂ boundary using low-intensity gamma radiation]. *Flagman nauki. Nauchny zhurnal* 2023;10(10):402-409. DOI: 10.37539/2949-1991.2023.10.10.017. (in Russ.)

5. Popov V.D., Belova G.F. [Physical principles of designing monolithic and hybrid silicon integrated circuits]. St. Petersburg: Lan Publishing; 2013. (in Russ.)

6. Sexton F.W., Schwank J.R. Correlation of radiation effects in transistors and integrated circuits. *IEEE Trans. on Nucl. Sci.* 1985;32(6):3975-3981.

7. Alekseev I.I. et al. Raikunova G.G., Doctor of Engineering, Professor, editor. [Cosmic ionising radiation and its effect on the onboard equipment of spacecraft]. Moscow: Physical education; 2013. (in Russ.)

Сведения об авторах

Кузьминова Алла Владимировна, Kuzminova Alla Vladimirovna, 109125, г. Москва, Российская Фе-

дерация; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Российская Федерация, Москва, НИЯУ МИФИ к.т.н., доцент кафедры Компьютерные системы информационных технологий National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Russian Federation, Moscow, MEPhI AVKuzminova@mephi.ru

Попов Виктор Дмитриевич, Popov Viktor Dmitrievich, г. Москва, Российская Федерация; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Российская Федерация, Москва, НИЯУ МИФИ д.т.н., профессор, Отделение нанотехнологий в электронике, спинтронике и фотонике офиса образовательных программ, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Russian Federation, Moscow, MEPhI wdpopov@mail.ru

About the authors

Alla V. Kuzminova, Moscow, 109125, Russian Federation; National Research Nuclear University MEPhI, Russian Federation, Moscow, Candidate of Engineering, Senior Lecturer, Department of Computer Systems of Information Technology, AVKuzminova@mephi.ru.

Viktor D. Popov, Moscow, Russian Federation; National Research Nuclear University MEPhI, Russian Federation, Moscow, Doctor of Engineering, Professor, Department of Nanotechnology in Electronics, Spintronics, and Photonics of the Educational Programs Office, wdpopov@mail.ru.

Вклад авторов в статью:

Кузьминова А.В. описала математически процессы проявления дефектов во времени.

Попов В.Д. выполнил разделение дефектов по времени при низкоинтенсивном облучении.

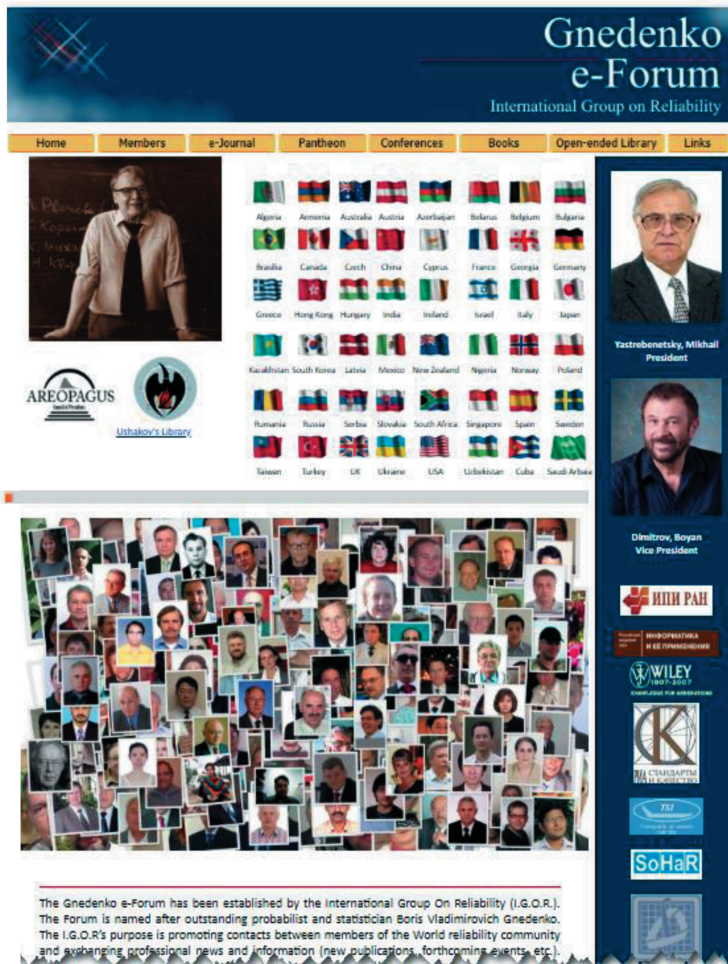
Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



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

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»

Тел./факс: +7 (495) 967-77-02,

e-mail: dependability@bk.ru

ИНН 7709868505 КПП 770901001

р/с 40702810100430000017, ПАО «УРАЛСИБ БАНК» г. Москва

к/с 30101810100000000787

Адрес доставки:

Кому: _____

Куда: _____

Для оформления подписки на журнал «Надежность» заполните заявку и отправьте ее по факсу или электронной почте.

По всем вопросам, связанным с подпиской, обращайтесь в редакцию журнала.

Периодичность – 4 номера в год.

ТРЕБОВАНИЯ РЕДАКЦИИ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛАХ ИЗДАТЕЛЬСКОЙ ГРУППЫ IDT PUBLISHERS

Требования к формату статьи

Статья представляется в редакцию в электронном формате, в виде файла, созданного в текстовом редакторе MS Word из пакета Microsoft Office (файл с расширением *.doc или *.docx). Текст набирается черным шрифтом на листе формата А4 с полями: левое, верхнее, нижнее – 2 см; правое – 1,5 или 2 см. Минимальный объем статьи – 5 страниц, максимальный (может быть увеличен по согласованию с редакцией) – 12 страниц. При этом статья включает структурные элементы, описание которых представлено ниже.

Структура материала статьи

Представленные ниже структурные элементы статьи отделяются друг от друга *пустой строкой*. Отдельные примеры оформления, как это должно выглядеть в тексте, выделены *синим шрифтом*.

1) Название статьи

Название статьи представляется на русском и английском языках. Название статьи на русском языке должно соответствовать содержанию статьи. Англоязычное название должно быть грамотно с точки зрения английского языка, при этом по смыслу полностью соответствовать русскоязычному названию.

Оформление: Текст названия набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, межстрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «полужирный». Точка в конце не ставится.

Пример:

Повышение надежности электронных компонентов
The Increasing of dependability of electronic components

2) Фамилия И.О. автора (авторов)

Данный структурный элемент для каждого автора включает:

- на русском языке – его фамилию и инициалы, после которых указывается сноска в виде цифры, набранной верхним индексом (надстрочным), которая ссылается на указание места работы автора. У фамилии автора, который будет контактировать с редакцией, также верхним индексом (после цифры) указывается символ «*»;

- на английском языке – его фамилию, имя и отчество в формате «Имя, инициал отчества, фамилия» (Ivan I. Ivanov). Фамилию на английском языке необходимо указывать в соответствии с заграничным паспортом или так, как она была указана в ранее опубликованных статьях. Если автор не имеет заграничного

паспорта и/или публикаций, для транслитерации фамилии и имени необходимо использовать стандарт BSI.

Оформление: Текст ФИО набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, межстрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «полужирный». ФИО разделяются запятой, точка в конце не ставится.

Пример:

Иванова А.А.¹, Петров В.В.^{2*}
Anna A. Ivanova, Victor V. Petrov

3) Место работы автора (авторов)

Место работы авторов приводится на русском языке, перед указанием места набирается верхним индексом (надстрочным) соответствующая цифра сноски, указывающая на имя автора.

Оформление: Текст места работы набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, межстрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный». Каждое место работы – с новой строки, точки в конце не ставятся.

Пример:

¹Московский государственный университет, Российская Федерация, Москва

²Санкт-Петербургский институт теплоэнергетики, Российская Федерация, Санкт-Петербург

4) Адрес электронной почты автора, который будет вести переписку с редакцией

Оформление: Текст адреса набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, межстрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный», все символы – строчные. Перед адресом набирается символ сноски «*». Точка в конце не ставится.

Пример:

*petrov_vv@aaa.ru

5) Резюме статьи

Данный структурный элемент включает структурированную аннотацию статьи объемом не менее 350 слов и не более 400 слов. Резюме представляется на русском и английском языках. Резюме должно содержать (желательно в явной форме) следующие разделы: Цель; Методы; Результаты; Выводы (на англ. яз.: Objective, Methods, Results, Conclusion). В резюме статьи не следует включать впервые введенные термины, аббревиатуры (за исключением общеизвестных), ссылки на литературу.

Оформление: Текст резюме набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный», кроме слов «**Резюме.**», «**Цель.**», «**Методы.**», «**Выводы.**» («**Objective.**», «**Methods.**», «**Results.**», «**Conclusion.**»), которые (вместе с точкой) должны иметь начертание шрифта «полужирный». Текст резюме на отдельные абзацы не разделяется (набирается в один абзац).

Пример (на рус. яз.):

Резюме. Цель. Предложить подход ... с учетом современных методик. **Методы.** В статье применяются методы математического анализа, ..., теории вероятностей. **Результаты.** С использованием предложенного метода получено... **Заключение.** Предлагаемый в статье подход позволяет...

6) Ключевые слова

Указывается 5-7 слов по теме статьи. Желательно, чтобы ключевые слова дополняли резюме (аннотацию) и название статьи. Ключевые слова указываются на русском и английском языках.

Оформление: Текст набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный», кроме слов «**Ключевые слова:**» («**Keywords:**») которые (вместе с двоеточием) должны иметь начертание «полужирный». Текст на отдельные абзацы не разделяется (набирается в один абзац). В конце ставится точка.

Пример (на рус. яз.):

Ключевые слова: надежность, функциональная безопасность, технические системы, управление рисками, техническая эффективность.

7) Текст статьи

Рекомендуется структурировать текст статьи в виде следующих разделов: Введение, Обзор источников, Методы, Результаты, Обсуждение, Заключение (или выводы). Рисунки и таблицы включаются в текст статьи (положение рисунков должно быть «в тексте», а не «за текстом» или «перед текстом»; без «обтекания текстом»).

Оформление:

Заголовки разделов набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, с абзацным отступом слева 1,25 см. Начертание шрифта «полужирный». Заголовки разделов (кроме введения и заключения (выводов)) могут иметь нумерацию арабскими цифрами с точкой после номера раздела. Номер с точкой отделяются от заголовка неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar).

Текст разделов набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, с абзацным отступом слева 1,25 см. Начертание шрифта «обычный» Текст разде-

лов разделяется на отдельные абзацы. Абзацный отступ не применяется для абзаца, следующего за формулой и содержащего пояснения к формуле, например:

где n – количество изделий.

Пример:

1. Состояние вопроса повышения надежности электронных компонентов

Проведенный анализ отечественной и зарубежной литературы по теме исследования показал, что...

Рисунки (фотографии, скриншоты) должны быть хорошего качества, пригодные для печати. Разрешение рисунка – не хуже 300 dpi. Если рисунок представляет собой схему, диаграмму, чертеж и т.п., то желательно вставлять такой рисунок в текст в редактируемом формате (MS Visio). Все рисунки должны иметь подрисовочные подписи. Рисунки нумеруются арабскими цифрами, по порядку следования в тексте. Если рисунок в тексте один, то он не нумеруется. Отсылки на рисунки оформляются следующим образом: «На рис. 3 указано, что ...» или «Указано, что ... (см. рис. 3)». Сокращение «рис.» и номер рисунка (если он есть) всегда разделяются неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar). Подрисовочная подпись включает порядковый номер рисунка и его название. Располагается на следующей строке после рисунка и выравнивается по центру:

Рис. 2. Описание жизненно важных процессов

Точка после подрисовочной подписи не ставится. *При выравнивании по центру абзацный отступ всегда должен отсутствовать!* Все обозначения, приведенные на рисунках, необходимо пояснять в основном или подрисовочном тексте. Недопустимы отличия в обозначениях на рисунках и в тексте (включая различие прямых/наклонных символов). *При проблемах с версткой рисунков, вставленных в текст, авторы должны по запросу редакции предоставить данные рисунки в графическом формате, в виде файлов с расширениями *.tiff, *.png, *.gif, *.jpg, *.eps.*

Таблицы должны быть хорошего качества, пригодные для печати. Таблицы должны быть пригодны для редактирования (а не отсканированные или в виде рисунков). Все таблицы должны иметь заголовки. Таблицы нумеруются арабскими цифрами, по порядку следования в тексте. Если таблица в тексте одна, то она не нумеруется. Отсылки на таблицы оформляются следующим образом: «В табл. 3 указано, что ...» или «Указано, что ... (см. табл. 3)». Сокращение «табл.» и номер таблицы (если он есть) всегда разделяются неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar). Заголовок таблицы включает порядковый номер таблицы и ее название. Располагается на строке, предшествующей таблице и выравнивается по центру:

Табл. 2. Описание жизненно важных процессов

Точка после заголовка таблицы не ставится. *При выравнивании по центру абзацный отступ всегда должен отсутствовать!* Все обозначения (символы), приведен-

ные в таблицах, необходимо пояснять в основном тексте. Недопустимы отличия в обозначениях в таблице и в тексте (включая различие прямых/наклонных символов).

Математические обозначения в тексте набираются заглавными и строчными буквами латинского, греческого и русского алфавитов. Латинские символы всегда набираются наклонным шрифтом (курсивом), кроме обозначений функций, таких как $\sin$, $\cos$, $\max$, $\min$ и т.п., которые набираются прямым шрифтом. Греческие и русские символы всегда набираются прямым шрифтом. Размер шрифта основного текста и математических обозначений (включая формулы) должен быть одинаков; верхние и нижние индексы масштабируются в MS Word автоматически.

Формулы могут быть включены непосредственно в текст, например:

Пусть $y = a \cdot x + b$, тогда...

либо набираться в отдельной строке, с выравниванием по центру, например:

$$y = a \cdot x + b.$$

При наборе формул как в тексте, так и в отдельной строке, знаки препинания должны ставиться по обычным правилам – точка, если формулой заканчивается предложение; запятая (или отсутствие знака препинания), если предложение после формулы продолжается. Для разделения формулы и текста рекомендуется для строки с формулой устанавливать вертикальные отступы (6 пт перед, 6 пт после). Если в тексте статьи делается отсылка на формулу, то такая формула обязательно набирается отдельной строкой, по правому краю которой указывается номер формулы в круглых скобках, например:

$$y = a \cdot x + b. \quad (1)$$

Если формула набирается в отдельной строке и имеет номер, то данная строка выравнивается по правому краю, а формула и номер разделяются знаком табуляции; позиция табуляции (в см) выбирается таким образом, чтобы формула располагалась примерно по центру. Формулы, на которые в тексте делаются отсылки, нумеруются арабскими цифрами, по порядку следования в тексте.

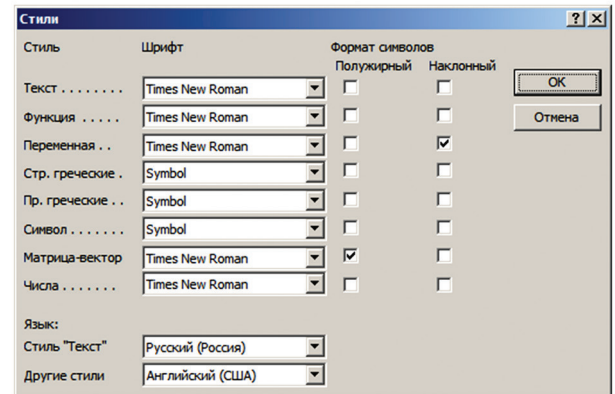
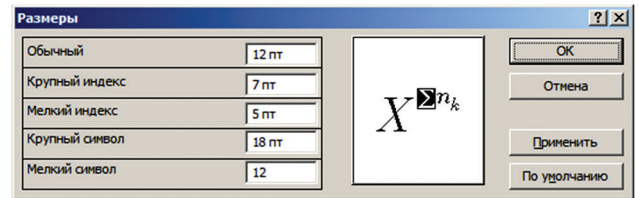
Простые формулы следует набирать без применения формульного редактора (использовать в MS Word русские и латинские буквы, а также меню «Вставка» + «Символ», если требуются греческие буквы и математические операторы), с соблюдением требуемого наклона для латинских символов, например:

$$\Omega = a + b \cdot \theta.$$

Если формула набирается без применения редактора формул, то между буквами и знаками «+», «-», «=» должны быть набраны неразрывные пробелы (Ctrl+Shift+Spacebar).

Сложные формулы набираются с применением редактора формул. Для отсутствия проблем с редак-

тированием формул и их версткой настоятельно рекомендуется использовать редакторы Microsoft Equation 3.0 или MathType 6.x. Для обеспечения корректного ввода формул (размер символов, их наклон и т.д.) рекомендуемые настройки редактора приведены на рисунках ниже.



При наборе формул в редакторе формул, если требуются скобки, то следует использовать скобки из формульного редактора, а не набирать их на клавиатуре (для корректной высоты скобок в зависимости от содержимого формулы), например (Equation 3.0):

$$Z = \frac{a \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i + \sum_{j=1}^m y_j \right)}{n + m}. \quad (2)$$

Сноски в тексте нумеруются арабскими цифрами, размещаются постранично. В сносках могут быть размещены: ссылки на анонимные источники в сети Интернет, ссылки на учебники, учебные пособия, ГОСТы, статистические отчеты, статьи в общественно-политических газетах и журналах, авторефераты, диссертации (если нет возможности процитировать статьи, опубликованные по результатам диссертационного исследования), комментарии автора.

Отсылка на библиографический источник указывается в тексте статьи в квадратных скобках, а источники приводятся в библиографическом списке в порядке их упоминания в тексте (затекстовые ссылки). Страница указывается внутри скобок, через запятую и пробел после номера источника: [6, с. 8]

8) Благодарности

В этом разделе указываются все источники финансирования исследования, а также благодарности людям, которые участвовали в работе над статьей, но не

являются ее авторами. Участие в работе над статьей подразумевает: рекомендации по совершенствованию исследования, предоставление пространства для исследования, ведомственный контроль, получение финансовой поддержки, одиночные виды анализа, предоставление реагентов/пациентов/животных/прочих материалов для исследования.

Оформление:

Сведения набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный».

9) Библиографический список

В библиографический список включаются только рецензируемые источники (статьи из научных журналов и монографии), упоминающиеся в тексте статьи. Нежелательно включать в библиографический список авторефераты, диссертации, учебники, учебные пособия, ГОСТы, информацию с сайтов, статистические отчеты, статьи в общественно-политических газетах, на сайтах и в блогах. Если необходимо сослаться на такую информацию, следует поместить информацию об источнике в сноску.

При описании источника следует указывать его DOI, если удастся его найти (для зарубежных источников удастся это сделать в 95% случаев).

Ссылки на принятые к публикации, но еще не опубликованные статьи должны быть помечены словами «в печати»; авторы должны получить письменное разрешение для ссылки на такие документы и подтверждение того, что они приняты к печати. Информация из неопубликованных источников должна быть отмечена словами «неопубликованные данные/документы», авторы также должны получить письменное подтверждение на использование таких материалов.

В ссылках на статьи из журналов должны быть обязательно указаны год выхода публикации, том и номер журнала, номера страниц.

В описании каждого источника должны быть представлены все авторы.

Ссылки должны быть верифицированы, выходные данные проверены на официальном сайте журналов и/или издательств.

Оформление:

Оформление ссылок (в русскоязычной версии журнала) должно выполняться по ГОСТ Р 7.0.5-2008. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления.

Библиографические ссылки набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, с абзацным отступом слева 1,25 см. Начертание шрифта «обычный» (см. примеры оформления в ГОСТ Р 7.0.5). Каждая

запись имеет нумерацию арабскими цифрами с точкой после номера раздела. Номер с точкой отделяются от записи неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar).

10) Сведения об авторах

Фамилия, имя, отчество полностью (на русском и английском языках); полный почтовый адрес (включая индекс, город и страну); полное наименование места работы, занимаемая должность; ученая степень, ученое звание, почетные звания; членство в общественных союзах, организациях, ассоциациях и т.д.; официальное англоязычное название учреждения (для версии на английском языке); адрес электронной почты; перечень и номера журналов, в которых ранее публиковались статьи автора; фото авторов для публикации в журнале.

Оформление:

Сведения набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный».

11) Вклад авторов в статью

Следует указать подробно, каким из авторов что сделано в статье. Например: Автором А. выполнен анализ литературы по теме исследования, автором Б. разработана модель объекта в реальных условиях эксплуатации, выполнен расчет примера и т.д. Даже если у статьи один автор, то требуется указание его вклада.

Оформление:

Сведения набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный».

12) Конфликт интересов

Конфликт интересов – это условия, при которых у людей возникают вступающие в конфликт или конкурирующие интересы, способные повлиять на принятие редакторского решения. Конфликты интересов могут быть потенциальными или осознанными, а также реально существующими. На объективность могут повлиять личные, политические, финансовые, научные или религиозные факторы.

Автор обязан уведомить редакцию о реальном или потенциальном конфликте интересов, включив информацию о конфликте интересов в статью.

Если конфликта интересов нет, автор должен также сообщить об этом. Пример формулировки: «Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов».

Оформление:

Текст набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный».