

НАДЕЖНОСТЬ

ISSN 1729-2646
e-ISSN 2500-3909

ТОМ **22**, №4

2022

НАУЧНО-
ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

В НОМЕРЕ

- ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ КОРПУСА ШПАЛЬНОГО СТРЕЛОЧНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА
- ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ПОДШИПНИКОВ БУКСОВЫХ УЗЛОВ КОЛЕСНЫХ ПАР ВАГОНОВ УДП-2001 СМ И СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ МЕХАНИЗМОВ ОМСД-02
- ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ СЕРВОПРИВОДОВ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ЗА СЧЕТ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМА РАБОТЫ
- ТЕХНОЛОГИЯ ПЕСКОСТРУЙНОЙ ОБРАБОТКИ КРЕМНИЕВОЙ ПЛАСТИНЫ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ
- ФЕНОМЕН ДОВЕРИЯ КАК ФАКТОР НАДЕЖНОСТИ В АВИАЦИИ
- ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО СОКРАЩЕНИЮ ЧИСЛА НАРУШЕНИЙ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ПОДВИЖНЫМ СОСТАВОМ
- ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДЕРЕВЬЕВ НЕИСПРАВНОСТЕЙ
- АНАЛИЗ УМАР – МЕТОДА СНИЖЕНИЯ РАЗМЕРНОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ В МАШИННОМ ОБУЧЕНИИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ОТКАЗОВ В ЛОКОМОТИВНОМ КОМПЛЕКСЕ
- ИТОГИ ЧЕТВЕРТОЙ ЕВРАЗИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ РИСК-2022 «ИННОВАЦИИ В МИНИМИЗАЦИИ ПРИРОДНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ РИСКОВ»

НИИАС

Информатизация, автоматизация
и связь на железнодорожном транспорте


НИИАС

www.vniias.ru

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПУБЛИКАЦИЙ В ЖУРНАЛЕ «НАДЕЖНОСТЬ»

■ СТРУКТУРНАЯ НАДЕЖНОСТЬ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

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

■ ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ НАДЕЖНОСТЬ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

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

■ ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СИСТЕМ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

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

■ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

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

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

■ УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

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

■ СЕРТИФИКАЦИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

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

■ ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ

ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор:

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

Заместители главного редактора:

Бочков Александр Владимирович – доктор технических наук, заместитель руководителя Научно-технического комплекса АО «НИИАС» (Москва, РФ)

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

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

Технический редактор:

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

Председатель редакционного совета:

Розенберг Игорь Наумович – доктор технических наук, профессор, член – корреспондент РАН, научный руководитель АО «НИИАС» (Москва, РФ)

Сопредседатель редакционного совета:

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

УЧРЕДИТЕЛИ ЖУРНАЛА:

АО «НИИАС», НП «ОПЖТ»,
Шубинский И.Б.

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

Регистрационное свидетельство

ПИ № ФС77-46055 от 05 августа 2011 года.

Официальный печатный орган Российской академии надежности

Издатель журнала

ООО «Журнал «Надежность»

Генеральный директор

Дубровская А.З.

Адрес: 109029, г. Москва,

ул. Нижегородская, д. 27, стр. 1, оф. 209

ООО «Журнал «Надежность»

www.dependability.ru

Отпечатано в ООО «Отмара. нет». 107140,

г. Москва, Верхняя Красносельская, 2/1, стр. 2,

этаж 2, пом II, ком. 2А, 2Б

Подписано в печать 15.12.2022

Объем , Тираж 500 экз, Заказ №

Формат 60x90/8, Бумага глянцев

Журнал издается ежеквартально с 2001 года,

стоимость одного экземпляра 1595 руб.,

годовой подписки 6380 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»)

СОДЕРЖАНИЕ

Структурная надежность. Теория, технология, практика

Оганьян Э.С., Чунин С.В., Фазлиахметов Д.М., Муравлев Е.В., Лобачев О.А. Оценка прочности корпуса шпального стрелочного электропривода	3
Отока А.Г., Будник Д.В., Лях А.М. Опыт использования установки для вибро-диагностики подшипников буксовых узлов колесных пар вагонов УДП-2001 СМ и системы диагностики механизмов ОМСД-02	8
Коробейников И.С., Вырыханов Д.А., Митяев М.В. Повышение надежности сервоприводов беспилотных летательных аппаратов за счет оптимизации режима работы	16
Шахмаева А.Р., Кардашова Г.Д., Казалиева Э., Евдулов Д.В. Технология пескоструйной обработки кремниевой пластины при изготовлении полупроводниковых транзисторов	23

Функциональная надежность. Теория и практика

Красильников Г.Т., КрачкоЭ.А., Мальчинский Ф.В. Феномен доверия как фактор надежности в авиации	28
Кулагин М.А., Сидоренко В.Г. Оценка экономической эффективности профилактических мероприятий по сокращению числа нарушений при управлении подвижным составом.....	37

Функциональная безопасность. Теория и практика

Можаева И.А., Струков А.В. Особенности оценки показателей функциональной безопасности систем противоаварийной автоматической защиты с использованием деревьев неисправностей	45
---	----

Обработка больших данных. Искусственный интеллект

Проневич О.Б, Клокова А.П. Анализ UMAP – метода снижения размерности исходных данных в машинном обучении для прогнозирования отказов в локомотивном комплексе	53
--	----

Информация

Итоги Четвертой Евразийской конференции РИСК-2022 «Инновации в минимизации природных и техногенных рисков» 11-13 октября 2022 года, Баку, Азербайджан	63
Гнеденко – Форум	65

Оценка прочности корпуса шпального стрелочного электропривода

Evaluating the strength of a beam-type electric switch mechanism housing

Оганьян Э.С.¹, Чунин С.В.^{1*}, Фазлиахметов Д.М.¹; Муравлев Е.В.¹, Лобачев О.А.¹

Oganian E.S.¹, Chunin S.V.^{1*}, Fazliakhmetov D.M.¹; Muravlev E.V.¹, Lobachev O.A.¹

¹Акционерное общество «Научно-исследовательский и конструкторско-технологический институт подвижного состава» (АО «ВНИКТИ»), Коломна, Российская Федерация

¹Joint Stock Company Research and Design Institute for Rolling Stock (JSC VNIKTI), Kolomna, Russian Federation

*chunin-sv@vnikti.com



Оганьян Э.С.



Чунин С.В.



Фазлиахметов Д.М.



Муравлев Е.В.



Лобачев О.А.

Резюме. Цель. Выбор метода и его апробация для подтверждения возможности безопасной эксплуатации корпуса стрелочного привода при осевых нагрузках подвижного состава 30 тс. **Метод.** На данный момент нормативной документацией не установлены требования к прочности несущих элементов стрелочных электроприводов, а также методы их контроля. В связи с этим для решения задачи оценки прочности корпуса электропривода был выбран подход, который используется при оценке прочности несущих элементов локомотивов по ГОСТ Р 55513-2013. Данный способ давно применяется при расчетах и испытаниях тягового подвижного состава и хорошо себя зарекомендовал. Согласно этому методу, оценка прочности проводится путем сравнения коэффициента запаса сопротивления усталости n с допускаемым значением для стальных конструкций $[n] = 2,0$. **Результат.** В результате проведенной работы была апробирована предлагаемая методика оценки прочности по критерию сопротивления усталости. Оценка значения предела выносливости корпуса электропривода выполнили по результатам стендовых испытаний на усталость трех объектов. При этом нагружение каждого из них проводили путем ступенчатого увеличения амплитуды действующей силы после достижения базового числа циклов. Величина нагрузки на первой ступени соответствовала эксплуатационной. После достижения базового числа циклов нагружения каждого объекта осуществлялся переход на следующую ступень. Испытания продолжались до обнаружения трещин. В процессе испытаний проводилась регистрация амплитуд напряжений на каждом уровне нагрузки. Для определения характеристик показателей сопротивления усталости был проведен расчет приведенного предела выносливости корпуса электропривода на основе гипотезы линейного суммирования усталостных повреждений с учетом условия детерминированного нагружения и с последующей обработкой полученных результатов статистическими методами. Получено значение предела выносливости корпуса шпального стрелочного электропривода, равное 48,4 МПа, при этом коэффициент запаса сопротивления усталости составил 2,86, что превышает минимально допустимое значение. **Заключение.** Установлено, что корпус шпального стрелочного электропривода обладает достаточной прочностью от действия эксплуатационных статических и динамических нагрузок, а также подтверждена возможность его безопасной эксплуатации при нагрузках на ось 30 тс.

Abstract. Aim. Choice of method and its validation for the purpose of confirming the feasibility of safe operation of a switch mechanism housing submitted to rolling stock axle loads of 30 tf. **Method.** As of today, there are neither regulations regarding the strength parameters of load-carrying elements of electric switch mechanisms, nor verification procedures. Given the above, when evaluating the strength of electric switch mechanism housing, the authors used the method used for the purpose of evaluating the strength of load-carrying elements of locomotives per GOST R 55513-2013. That method has a long history of application as part of calculation and testing of motive power and has shown good results. According to the method, strength is evaluated by comparing the safety factor of fatigue strength n with the allowed value for steel structures $[n] = 2.0$. **Result.** The activities resulted in the validation of the proposed method of strength estimation by the criterion of fatigue strength. The value of fatigue endurance of electric switch mechanism housing was estimated based on the results of fatigue benchmark tests of three items. Each was stressed by stepping up the amplitude of the applied force after the base number of cycles had been reached. At the first stage, the loading was equivalent to the operational value. After the base number of functions had been reached for each item, the following step was initiated. The tests continued until cracks have been found. In the process of testing, the amplitude of stress was recorded at each level of loading. For the purpose of identifying the fatigue strength characteristics, the reduced fatigue strength

of the switch mechanism housing was calculated under the hypothesis of linear addition of fatigue damage subject to the condition of deterministic loading and subsequent processing of the findings using statistical methods. The value of fatigue limit has been obtained for the housing of a tie-type electric switch mechanism equal to 48.4 MPa. The safety factor of fatigue strength was found to be equal to 2.86, which is above the minimal allowed value. **Conclusion.** It has been shown that the housing of a tie-type electric switch mechanism has a sufficient strength as regards the operational static and dynamic loads. Its safe operation when exposed to axle loads of 30 tf has also been confirmed.

Ключевые слова: испытания на усталость, корпус шпального электропривода стрелочного, оценка прочности, предел выносливости, запас сопротивления усталости.

Keywords: fatigue tests, beam-type electric switch mechanism housing, strength evaluation, fatigue limit, safety factor of fatigue strength.

Для цитирования: Оганьян Э.С., Чунин С.В., Фазлиахметов Д.М., Муравлев Е.В., Лобачев О.А. Оценка прочности корпуса шпального стрелочного электропривода // Надежность. 2022. № 4. С. 3-7. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-4-3-7>

For citation: Oganian E.S., Chunin S.V., Fazliakhmetov D.M.; Muravlev E.V., Lobachev O.A. Evaluating the strength of a beam-type electric switch mechanism housing. Dependability 2022;4:3-7. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-4-3-7>

Поступила 21.09.2022 / **После доработки** 20.10.2022 / **К печати** 15.12.2022

Received on: 21.09.2022 / **Revised on:** 20.10.2022 / **For printing:** 15.12.2022.

Введение

В связи с развитием на железных дорогах России тяжеловесного движения возникла необходимость в оценке элементов верхнего строения пути с точки зрения прочности. Одним из таких элементов является стрелочный электропривод шпального типа, корпус которого испытывает максимальные нагрузки, передающиеся через рельсы, от воздействия колес подвижного состава. Целью данной работы является выбор метода и апробация его для подтверждения возможности безопасной эксплуатации корпуса стрелочного привода при осевых нагрузках подвижного состава 30 тс.

Постановка задачи

На сегодняшний день нормативной документацией не установлены требования к прочности несущих элементов стрелочных электроприводов, а также методы их контроля. В связи с этим для решения задачи оценки прочности корпуса электропривода был выбран подход, использующийся при оценке прочности несущих элементов локомотивов по ГОСТ Р 55513-2013 [1]. Данный способ давно применяется при расчетах и испытаниях тягового подвижного состава и хорошо себя зарекомендовал. Согласно этому методу, оценка прочности проводится путем сравнения коэффициента запаса сопротивления усталости n с допускаемым значением (в нашем случае для стальных конструкций $[n] = 2,0$).

Для определения коэффициента запаса сопротивления усталости необходимо иметь данные о пределе выносливости корпуса, который определяется экспериментально, а также информацию об эксплуатационной нагруженности.

Оценка эксплуатационной нагруженности корпуса электропривода

По результатам проведенной АО «ВНИКТИ» научно-исследовательской работы по определению спектра нагрузок от подвижного состава для различных условий эксплуатации и оценке нагруженности элементов верхнего строения пути было установлено, что для осевой нагрузки 30 тс, с учетом распределения нагрузки по соседним шпалам, максимальная вертикальная сила составляет 105,8 кН.

Для определения наиболее нагруженных мест в конструкции корпуса электропривода была создана конечно-элементная модель и проведены расчеты ее напряженно-деформированного состояния под действием выбранной нагрузки. Было выяснено, что максимальные растягивающие механические напряжения

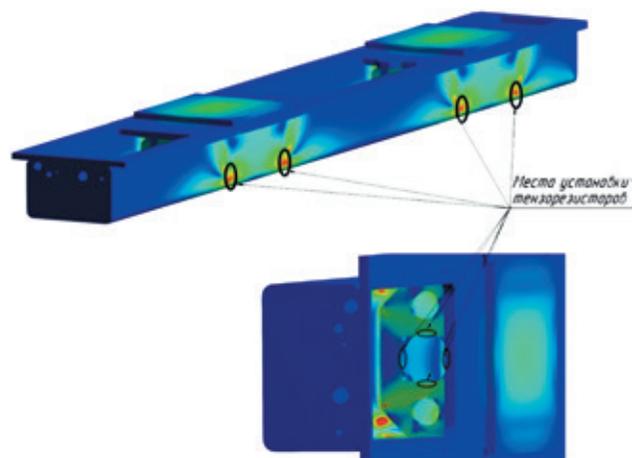


Рис. 1. Места установки тензорезисторов на корпусе шпального стрелочного электропривода

Табл. 1. Результаты испытаний корпусов

№ корпуса	№ зоны	№ ступени нагружения	Нагрузка, кН	Динамическое напряжение в зоне возникновения повреждений, МПа	Количество циклов нагружения, млн	Результат
1	1.1	1-1	62,1±50,8	5,5	10	Без повреждений
		1-2	93,2±76,1	9,5		
		1-3	186,3±152,4	26,0	2	
		1-4	372,6±304,8	54,0	2,75	
	1.2*	1-1	62,1±50,8	13,0	10	Без повреждений
		1-2	93,2 ±76,1	22,5		
		1-3	186,3±152,4	42,5	2	
		1-4	372,6±304,8	84,0	2,75	
2	2.1	2-1	124,2±101,6	17,0	10	Трещина
		2-2	372,6±304,8	54,0	5,21	Без повреждений
	2.2*	2-1	124,2±101,6	25,0	10	Трещина
		2-2	372,6±304,8	78,0	5,21	Без повреждений
3	3.1	3-1	124,2±101,8	42,5	10	Трещина
		3-2	310,5±254,0	62,0	1,35	Без повреждений

*Зона, симметрично расположенная по отношению к зоне повреждений

не превосходят 42 МПа, а также определены места для установки тензорезисторов, необходимых при проведении стендовых испытаний по оценке предела выносливости (рис. 1).

Стендовые испытания по оценке предела выносливости

Оценку значения предела выносливости корпуса электропривода выполнили по результатам стендовых испытаний на усталость на трех объектах. При этом нагружение каждого из них проводили путем ступенчатого увеличения амплитуды действующей силы после достижения базового числа циклов. Величина нагрузки на первой ступени соответствовала эксплуатационной.

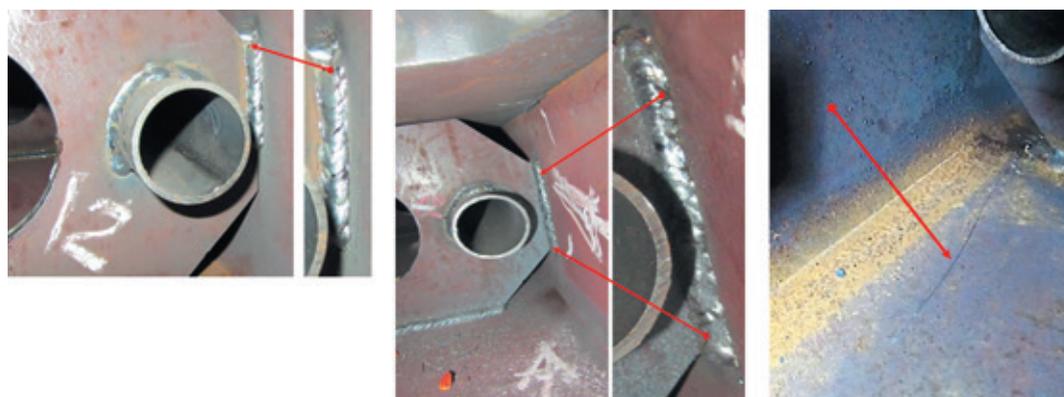
Оборудованные тензорезисторами корпуса электроприводов были установлены на стенд СТ-212 (рис. 2). Испытательная нагрузка прикладывалась через специализированную технологическую оснастку в соответствующие места корпуса.



Рис. 2. Испытания корпуса электропривода на стенде СТ-212

После достижения базового числа циклов нагружения каждого объекта осуществлялся переход на следующую ступень, и испытания продолжались до обнаружения трещин (рис. 3).

В процессе испытаний проводилась регистрация амплитуд напряжений на каждом уровне нагрузки. Результаты испытаний корпусов приведены в табл. 1.



Корпус №1

Корпус №2

Корпус №3

Рис. 3. Трещины в корпусах электроприводов

Для определения характеристик показателей сопротивления усталости был проведен расчет предела выносливости корпуса электропривода на основе линейной гипотезы суммирования усталостных повреждений с учетом условия детерминированного нагружения и последующей обработкой полученных результатов статистическими методами. Расчет приведенного предела выносливости $\bar{\sigma}_{Rk}$ выполнен на основе гипотезы линейного суммирования усталостных повреждений по формуле:

$$\bar{\sigma}_{Rk} = \sqrt[m]{\frac{1}{N_0} \sum_i \sigma_i^m N_i}, \quad (1)$$

где N_0 – приведенная база испытаний;

i – степень нагружения;

N_i – количество циклов на ступени нагружения;

σ_i – амплитуда напряжений цикла на ступени;

m – показатель угла наклона кривой усталости, определяется методом эквивалентных напряжений Гохберга – Розовского [2]:

$$m = c_y / [0,454 + \lg(\sigma_{-1} / \sigma_{-1k})], \quad (2)$$

где c_y – коэффициент, учитывающий отношение предела выносливости материала к приведенному пределу выносливости корпуса, $c_y = 3,3$ при $\sigma_{-1} / \sigma_{-1k} < 2$ и $c_y = 3,7$ при $\sigma_{-1} / \sigma_{-1k} \geq 2$;

σ_{-1} – предел выносливости металла корпуса, равный 184,5 МПа.

Для решения уравнений (1) и (2) применяется метод последовательных приближений.

Приведенные пределы выносливости $\bar{\sigma}_{Rk}$ для каждой зоны представлены в табл. 2.

Табл. 2. Приведенные пределы выносливости $\bar{\sigma}_{Rk}$

№ зоны	Приведенная база испытаний N_0 , млн циклов	Приведенный предел выносливости $\bar{\sigma}_{Rk}$, МПа
1.1	10	37,0
	2	59,3
1.2*	10	61,8
	4	78,0
2.1	10	45,0
	6	75,7
2.2*	10	67,0
	8	70,7
3.1	10	47,8
	5	57,3

*Зона, симметрично расположенная по отношению к зоне повреждений

Полученные результаты были обработаны с использованием статистических методов [3]. Результаты приведены на рис. 4.

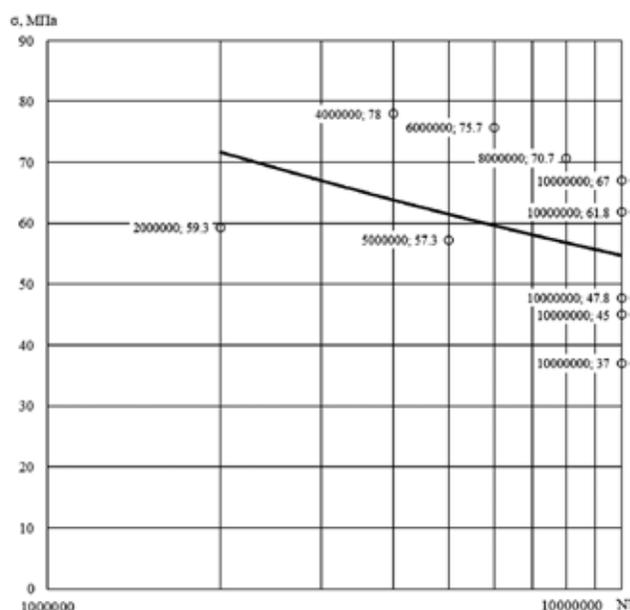


Рис. 4. Кривая усталости корпуса стрелочного шпального электропривода (в полулогарифмической системе координат)

Значение предела выносливости корпуса электропривода с вероятностью $P = 0,95$ составляет 48,4 МПа.

Расчет коэффициента запаса сопротивления усталости

Расчет коэффициента запаса сопротивления усталости n проводился по следующей формуле (п. 8.3.3 [1]):

$$n = \frac{\sigma_{-1д}}{\sigma_a + \frac{\psi_\sigma}{K_\sigma} \sigma_m} = \frac{48,4}{14,5 + \frac{0,3}{1,833} \cdot 14,5} = 2,86, \quad (3)$$

где $\sigma_{-1д}$ – предел выносливости детали, определенный экспериментально, $\sigma_{-1д} = 48,4$ МПа;

σ_a и σ_m – амплитуда и среднее значение напряжения цикла, возникающие при действии эксплуатационной нагрузки, $\sigma_a = 14,5$ МПа, $\sigma_m = 14,5$ МПа;

ψ_σ – коэффициент, характеризующий влияние асимметрии цикла, $\psi_\sigma = 0,3$;

K_σ – коэффициент, характеризующий понижение предела выносливости конструкции по отношению к пределу выносливости стандартного образца:

$$K_\sigma = \frac{K_1 \cdot K_2}{\gamma \cdot K_m} \cdot K_3 = \frac{1,1 \cdot 1,0}{0,75 \cdot 0,8} \cdot 1,0 = 1,833, \quad (4)$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий влияние неоднородности материала детали, $K_1 = 1,1$;

K_2 – коэффициенты, учитывающие влияние внутренних напряжений в детали, $K_2 = 1$;

K_m – коэффициент, учитывающий состояние поверхности детали, $K_m = 0,8$;

γ – коэффициент, учитывающий влияние размерного фактора, $\gamma = 0,75$;

K_3 – корректирующий коэффициент, $K_3 = 1$.

Значения указанных коэффициентов приняты в соответствии с [1].

Выводы

В результате проведенной работы была апробирована предлагаемая методика оценки прочности по критерию сопротивления усталости. Получено значение предела выносливости корпуса шпального стрелочного электропривода, равное 48,4 МПа, при этом коэффициент запаса сопротивления усталости составил 2,86, т.е. он находится в допустимых пределах (превышает минимальное значение 2,0) по [1].

Это доказывает, что корпус обладает достаточной прочностью при воздействии статических и динамических нагрузок, возникающих в эксплуатации при осевых нагрузках 30 тс.

Библиографический список

- ГОСТ Р 55513-2013. Локомотивы. Требования к прочности и динамическим качествам. М.: Стандартинформ, 2014. III, 41 с.
- Савоськин А.Н., Бурчак Г.П., Матвеевичев А.Н. и др. Прочность и безотказность подвижного состава железных дорог / под общ. ред. А.Н. Савоськина. М.: Машиностроение, 1990. 288 с.
- Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний. М.: Машиностроение, 1985. 231 с.
- Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: Машиностроение, 1993. 364 с.

References

- GOST R 55513-2013. Locomotives. Requirements for strength and dynamic properties. Moscow: Standartinform; 2014. (in Russ.)
- Savoskin A.N., Burchak G.P., Matveevichev A.N. et al. Savoskin A.N., editor. [Strength and reliability of railway rolling stock]. Moscow: Mashinostroenie; 1990. (in Russ.)
- Stepnov M.N. [Statistical methods for processing the results of mechanical tests]. Moscow: Mashinostroenie; 1985. (in Russ.)
- Kogaev V.P. [Time-variable strength calculation]. Moscow: Mashinostroenie; 1993. (in Russ.)

Сведения об авторах

Оганьян Эдуард Сергеевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник АО «ВНИКТИ», ул. Октябрьской революции, 410, г. Коломна, Московская область, Российская Федерация, 140402, e-mail: oganian-es@vnikti.com

Чунин Сергей Владимирович – заведующий лабораторией АО «ВНИКТИ», ул. Октябрьской революции, 410, г. Коломна, Московская область, Российская Федерация, 140402, e-mail: chunin-sv@vnikti.com

Фазлиахметов Дамир Муратович – ведущий инженер АО «ВНИКТИ», ул. Октябрьской революции, 410, г. Коломна, Московская область, Российская Федерация, 140402, e-mail: fazliahmetov-dm@vnikti.com

Муравлев Евгений Владимирович – ведущий инженер АО «ВНИКТИ», ул. Октябрьской революции, 410, г. Коломна, Московская область, Российская Федерация, 140402, e-mail: muravlev-ev@vnikti.com

Лобачев Олег Александрович – ведущий инженер АО «ВНИКТИ», ул. Октябрьской революции, 410, г. Коломна, Московская область, Российская Федерация, 140402, e-mail: lobachev-oa@vnikti.com

About the authors

Eduard S. Oganian, Doctor of Engineering, Head Researcher, JSC VNIKTI, 410 Oktyabsrskoy revolutsii st., 140402, Kolomna, Moscow Oblast, Russian Federation, e-mail: oganian-es@vnikti.com

Sergey V. Chunin, Head of Laboratory, JSC VNIKTI, 410 Oktyabsrskoy revolutsii st., 140402, Kolomna, Moscow Oblast, Russian Federation, e-mail: chunin-sv@vnikti.com

Damir M. Fazliakhmetov, Lead Engineer, JSC VNIKTI, 410 Oktyabsrskoy revolutsii st., 140402, Kolomna, Moscow Oblast, Russian Federation, e-mail: fazliahmetov-dm@vnikti.com

Yevgeny E. Muravlev, Lead Engineer, JSC VNIKTI, 410 Oktyabsrskoy revolutsii st., 140402, Kolomna, Moscow Oblast, Russian Federation, e-mail: muravlev-ev@vnikti.com

Oleg A. Lovachev, Lead Engineer, JSC VNIKTI, 410 Oktyabsrskoy revolutsii st., 140402, Kolomna, Moscow Oblast, Russian Federation, e-mail: lobachev-oa@vnikti.com

Вклад авторов в статью

Оганьян Э.С. – методические и научное сопровождение.

Чунин С.В. – организация проведения испытаний и анализ их результатов.

Фазлиахметов Д.М. – проведение испытаний, обработка и анализ результатов.

Муравлевым Е.В. – проведение испытаний, обработка и анализ результатов.

Лобачев О.А. – проведение испытаний, тензометрирование, выполнение прочностных расчетов, обработка результатов расчетов и испытаний.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Опыт использования установки для вибродиагностики подшипников буксовых узлов колесных пар вагонов УДП-2001 СМ и системы диагностики механизмов ОМСД-02

Experience of operation of the UDP-2001SM railway wheelset bearing vibration diagnostics installation and the OMSD-02 mechanism diagnostics system

Отока А.Г.^{1*}, Будник Д.В.², Лях А.М.³
Otoka A.G.^{1*}, Budnik D.V.², Liakh A.M.³

¹Гомельское вагонное депо РУП «Гомельское отделение Белорусской железной дороги», Гомель, Республика Беларусь, ²Жлобинское вагонное депо РУП «Гомельское отделение Белорусской железной дороги», Жлобин, Республика Беларусь, ³Могилевское вагонное депо РУП «Могилевское отделение Белорусской железной дороги», Могилев, Республика Беларусь

¹Gomel Car Shop, Gomel Division of the Belarusian Railway, Gomel, Republic of Belarus, ²Zhlobin Car Shop, Gomel Division of the Belarusian Railway, Zhlobin, Republic of Belarus, ³Mogilev Car Shop, Mogilev Division of the Belarusian Railway, Mogilev, Republic of Belarus

*otokaa@mail.ru



Отока А.Г.



Будник Д.В.



Лях А.М.

Резюме. Цель этой статьи состоит в сравнении установки для вибродиагностики подшипников колесных пар грузовых, рефрижераторных и пассажирских вагонов УДП-2001СМ с системой диагностики механизмов ОМСД-02, которая применяется на Белорусской железной дороге относительно недавно. **Методы.** В качестве анализа установки вибродиагностики УДП-2001СМ и системы диагностики механизмов ОМСД-02 рассматривались номенклатура выявляющих дефектов, способ установки пороговых значений (эталонных уровней) виброакустических импульсов и шумов для критерия «Брак» и «Годен», статистические данные забраковки буксовых узлов колесных пар грузовых и пассажирских вагонов по отношению к общему объему проведенных измерений, опыт эксплуатации различных депо Белорусской железной дороги. **Результаты.** Описана технология вибродиагностического контроля подшипников колесных пар грузовых и пассажирских вагонов на примере стационарного съема виброакустических сигналов с пластин звукопроводов, на которые устанавливается диагностируемая букса. Представлены структурные схемы установки УДП-2001 СМ и системы ОМСД-02, а также дефекты подшипников, подлежащие выявлению на данном диагностическом оборудовании. **Заключение.** Приведены достоинства и недостатки вышеописанных диагностических комплексов на основе опыта использования различных вагонных депо Белорусской железной дороги.

Abstract. The Aim of the paper is to compare the UDP-2001SM installation for vibration diagnostics of bearings of freight, refrigerator and passenger car wheels and the OMSD-02 mechanism diagnostics system that since recently has been used in the Belarusian Railway.

Methods. By way of analysis of the UDP-2001SM vibration diagnostics installation and the OMSD-02 mechanism diagnostics system, the authors considered the list of identifiable defects, method for defining threshold values (reference levels) of vibroacoustic pulses and noises for the criteria of “faulty” and “good”, statistical data for rejected axleboxes of freight and passenger car wheelsets in respect to the overall number of conducted measurements, the experience of operation in various car shops of the Belarusian Railway. **Results.** The paper describes the process of vibration diagnostics of wheelset bearings of freight and passenger cars using the case of stationary acquisition of vibroacoustic signals from acoustic plates that interact with the diagnosed axlebox. The authors present the diagrams of the UDP-2001SM installation and OMSD-02 system, as well as the defects of bearings that are to be identified using the above diagnostics equipment. **Conclusion.** The paper showed the advantages and disadvantages of the above diagnostics systems based on the experience of their application in a number of car shops of the Belarusian Railway.

Ключевые слова: вибродиагностика, установка УДП-2001СМ, система диагностики механизмов ОМСД-02, колесная пара, буксовый узел, подшипник, виброакустический сигнал, преобразователь пьезоэлектрический виброизмерительный ДН-3-М1, вибропреобразователь АР57 (АР1057).

Keywords: vibration diagnostics, UDP-2001SM installation, PMSD-02 mechanism diagnostics system, wheelset, axlebox, bearing, vibroacoustic signal, DN-3-M1 piezoelectric vibration measurement transformer, AR57 (AR1057) vibrator converter.

Для цитирования: Отока А.Г., Будник Д.В., Лях А.М. Опыт использования установки для вибродиагностики подшипников буксовых узлов колесных пар вагонов УДП-2001СМ и системы диагностики механизмов ОМСД-02 // Надежность. 2022. №4. С. 8-15. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-4-8-15>

For citation: Otoka A.G., Budnik D.V., Liakh A.M. Experience of operation of the UDP-2001SM installation for railway wheelset bearing vibration diagnostics and the OMSD-02 mechanism diagnostics system. Dependability 2022;4: 8-15. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-4-8-15>

Поступила 12.09.2022/ После доработки 20.10.2022 / К печати 15.12.2022

Received on: 12.09.2022 / Revised on: 20.10.2022 / For printing: 15.12.2022.

Введение

Безопасность движения поездов, перевозки грузов и пассажиров в значительной мере зависят от надежности приборов контроля качества и диагностики состояния объектов.

На сегодняшний день на Белорусской железной дороге для оценки технического состояния и определения неисправностей подшипников буксовых узлов колесных пар (далее – КП) вагонов используются установка УДП-2001СМ и система диагностики механизмов (далее – система) ОМСД-02.

Система ОМСД-02 появилась на дороге сравнительно недавно по отношению к установке УДП-2001СМ, которая уже более 15 лет функционирует на ремонтных предприятиях и занимает 80% всего диагностируемого оборудования.

Проведение вибродиагностики на установке УДП-2001СМ

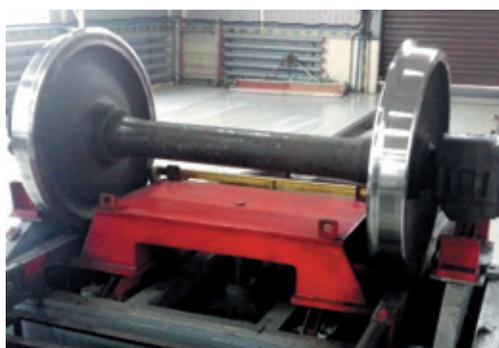
Установка УДП-2001СМ в различных исполнениях может быть использована при ремонте буксовых узлов КП грузовых, рефрижераторных и пассажирских вагонов в вагонных депо.

Установка выявляет дефекты и повреждения подшипников:

- усталостные и коррозионные раковины на дорожках качения наружных, внутренних колец и на поверхности роликов;
- разрывы внутреннего кольца;
- ступенчатые сколы и полный откол борта внутреннего кольца;
- сколы борта наружного кольца;
- сколы торцов роликов;
- задиры и ползуны на дорожках качения внутреннего кольца и на поверхности роликов;
- изломы плоского упорного кольца;
- задиры на торцах роликов и бортах колец и др. дефектов в соответствии с [1].

Установка УДП-2001СМ обеспечивает:

1. Оценку технического состояния и разбраковку буксовых узлов КП вагонов по альтернативному признаку «Брак» или «Годеи»;
2. Количественную оценку амплитуды и энергии виброакустических шумов подшипника;
3. Подачу тревожного звукового и светового сигналов в случае выявления бракованного буксового узла;
4. Динамическую индикацию входных сигналов во время измерения;
5. Подробное графическое отображения входных сигналов во временной и спектральной области;
6. Запоминание до 10 000 записей с результатами диагностики. Каждая запись содержит: дату и время



а)



б)



в)

а – стенд для раскрутки колесной пары; б – пульт управления стендом с устройством вибродиагностики; в – преобразователь пьезоэлектрический виброизмерительный ДН-3-М1

Рис. 1. Установка УДП-2001СМ

проведения диагностики, номер КП, код ее завода-изготовителя, результат диагностики; частоту вращения КП;

7. Ввод результатов диагностики в персональный компьютер с последующим сохранением в программном средстве «База данных УДП-2001»;

8. Измерение частоты вращения КП;

9. Блокировку неактивных фаз работы станда;

10. Автоматизированную обкатку КП с регулируемым временем от 1 до 10 мин с последующей диагностикой.

В состав установки УДП-2001СМ (рис. 1) входит:

1. Раскручивающий стенд, позволяющий проводить установку и раскрутку КП с частотой не менее 300 об/мин;

2. Пульт управления, с помощью которого осуществляется управление раскручивающим стендом и изменение частоты вращения КП;

3. Устройство вибродиагностики подшипников колесных пар УДП-2001, обеспечивающее оценку технического состояния, разбраковку буксовых узлов КП вагонов по альтернативному принципу «Брак» или «Годен» и сохранение результатов диагностики;

4. Программное средство «База данных УДП-2001» используется для хранения и статистической обработки полученных результатов диагностирования и выдачи документа (протокол диагностики подшипников) для выбранной даты и времени.

В установке УДП-2001СМ применен стационарный съем виброакустических сигналов с пластин звукопроводов, на которые устанавливается диагностируемая букса. Крепление датчиков-акселерометров (преобразователь пьезоэлектрический виброизмерительный ДН-3-М1) к пластинам осуществляется с помощью стальной шпильки. Тем самым обеспечивается надежный, наиболее полный съем акустических сигналов.

Электрические колебания с датчиков-акселерометров поступают на коммутационную планку блока питания, встроенного в пульт управления. Здесь помимо коммутации соединений производится частичное снижение добротности системы датчик-кабель, для уменьшения собственных шумов установки.

С коммутационной панели виброакустический сигнал поступает на устройство вибродиагностики колесных пар УДП-2001, осуществляющего основной алгоритм диагностики буксовых узлов.

Структурная схема устройства УДП-2001 приведена на рис. 2.

Электрические сигналы с пьезоэлектрических датчиков испытательного станда поступают на входы усилителей. С выходов усилителей сигналы попадают на пиковые детекторы. Протектированные сигналы подаются на аналого-цифровые преобразователи (далее – АЦП), преобразующие мгновенные значения аналоговых сигналов в цифровой код. Полученный цифровой код принимается микропроцессором, который осуществляет всю дальнейшую обработку сигналов. Входящий в состав устройства таймер-календарь хранит время и текущую дату. Автономный источник электропитания

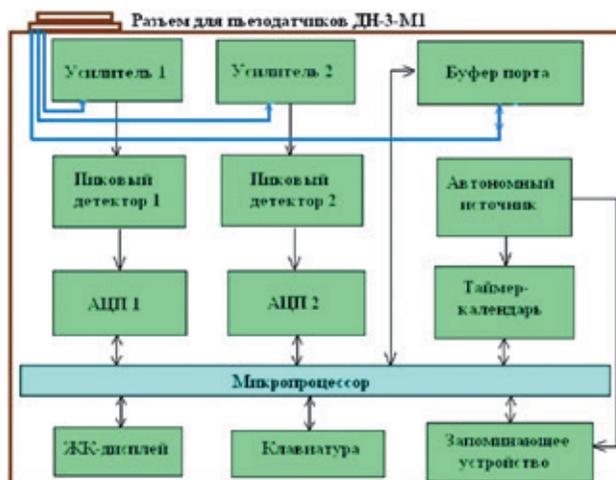


Рис. 2. Схема УДП-2001

питает таймер при отключении сетевого питания, что позволяет сохранить правильный ход часов и календаря. Запоминающее устройство служит для хранения результатов диагностирования КП.

Для определения качества буксовых узлов и идентификации дефектов в устройстве УДП-2001 применяются 3 метода диагностики:

1. Амплитудный – служит для определения развитых дефектов. Сущность заключается в подсчете количества импульсов за интервал измерения, амплитуды которых превысили пороговое напряжение после цифровой обработки, условно принятое равным $U_{пор} = 3 В$.

2. Энергетический – основан на вычислении общей энергии сигнала за интервал измерения и ее сравнения с заданным пороговым значением.

3. Временной – предназначен для идентификации поврежденных элементов подшипника (ролик, внутреннее кольцо, наружное кольцо). Сущность метода заключается в измерении временных интервалов между сгустками амплитуд виброускорений.

Измеренные периоды с определенным доверительным интервалом сравниваются с эталонными значениями, вычисляемыми по формулам:

$$T_{др} = \frac{D_p(D_b + D_p)}{D_b(D_b + 2D_p)} T_b \quad (1)$$

$$T_{дв} = \frac{2(D_b + D_p)}{N(D_b + 2D_p)} T_b \quad (2)$$

$$T_{дн} = \frac{2(D_b + D_p)}{ND_b} T_b \quad (3)$$

где $T_{др}$, $T_{дв}$, $T_{дн}$ – периоды дефектов: роликов, внутреннего и наружного кольца соответственно;

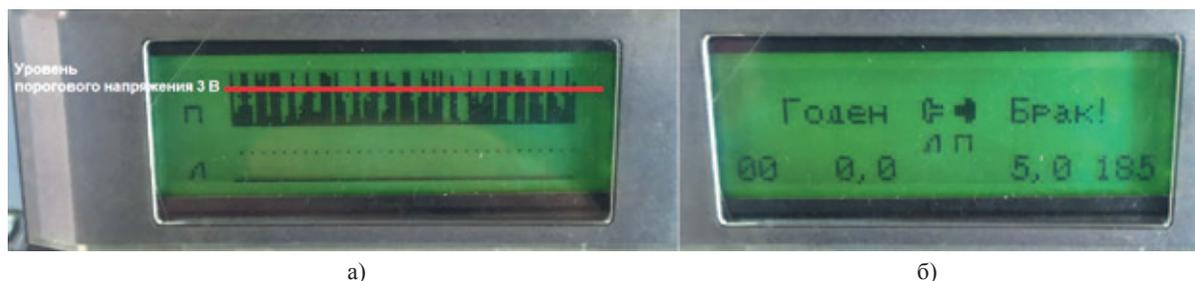
N – количество роликов в подшипнике;

D_b – диаметр внутреннего кольца;

D_p – диаметр ролика;

T_b – период вращения КП.

Определение дефекта возможно, если частота вращения КП соответствует 300–350 об/мин. Все



а – вид индикатора во время диагностирования; б – вид индикатора после диагностирования

Рис. 3. Результаты диагностирования буксовых узлов колесной пары

рассмотренные методы диагностики в устройстве работают одновременно. Решение «Брак» выносится по амплитудному и энергетическому методу в том случае, если букса признана негодной хотя бы одному из этих методов. Временной метод прямым образом на результат не влияет, но, тем не менее, несет дополнительную информацию при диагностике буксовых узлов.

Устройство представляет амплитуды виброакустических сигналов по шестнадцатиуровневой шкале. Диапазон изменения сигнала на выходе пикового детектора от 0 до 5 В разбивается на шестнадцать уровней с шагом $5/15 = 0,33$ В. В качестве значения амплитуды принимается самый высокий уровень, который сигнал за время измерения превысил десять раз.

На примере рис. 3 значение амплитуды сигнала правого буксового узла, которое отображается на экране устройства вибродиагностики, составляет 5 В, что превышает уровень порогового напряжения 3В.

Проверка работоспособности установки осуществляется с помощью контрольного образца, который представляет собой специальным образом сформированную КП, содержащую ролик с искусственным дефектом в виде пропила на всю длину 52 мм глубиной и шириной $1,0 \pm 0,1$ мм в одном из смонтированном буксовом узле (букса № 1) и исправные роликовые подшипники в другом смонтированном буксовом узле (букса № 2).

При этом устройство вибродиагностики должно показывать уровни импульсов и энергию шумов в 10% допуске от значений установленных представителями

фирмы-изготовителя как правого, так и левого каналов (для правой и левой стороны). В случае неполучения желаемых результатов, настройка порога осуществляется при помощи переменных резисторов СП4-1, расположенных на встроенном в пульт управления блоке питания. Таким образом, уменьшая или увеличивая степень демпфирования виброакселерометров, подстраивается эталонный уровень (порог) виброакустических импульсов и шумов [2].

Проведение вибродиагностики системой диагностики механизмов ОМСД-02

Система ОМСД-02 на вагонных предприятиях представляет собой комплекс оборудования с программным обеспечением на базе раскручивающего стенда УДП-2001СМ. Система ОМСД-02 предназначена для измерения среднего квадратического значения (далее – СКЗ) виброускорения при диагностике механизмов подвижного состава железнодорожного транспорта [3].

Для обнаружения и идентификации дефектов подшипников буксовых узлов реализованы методы узкополосного спектрального анализа вибрации и огибающей ее высокочастотной составляющей. Методы анализа прямого спектра ориентированы в первую очередь на выявление повреждений поверхностей качения распределенного типа – коррозия, износ, шелушение, а также дефектов смазки и развитых дефектов сосредоточен-



а)



б)



в)

а – стенд для раскрутки колесной пары (база раскручивающего стенда УДП-2001); б – измерительный прибор системы; в – вибропреобразователь пьезоэлектрический AP57

Рис. 4. Система ОМСД-02

ного типа – раковин и трещин. При анализе спектра огибающей высокочастотной составляющей вибрации основное внимание уделено дефектам сосредоточенного типа на всех стадиях развития – от зарождающегося до предаварийного. К особенностям использования данных методов следует отнести необходимости обеспечения стабильности частоты вращения от измерения к измерению не хуже 10% отклонения от номинала. Дополнительно системой производится оценка состояния подшипников по параметрам СКЗ и эксцесса. Дополнительные параметры позволяют производить оценку технического состояния в случае невозможности обеспечения необходимой частоты вращения или в случае полного разрушения подшипника. Для этих случаев характерно отсутствие или несовпадение основных частот вращения подшипника с расчетными частотами [4].

ОМСД-02 (рис. 4) представляет собой информационно-измерительную систему с обменом информации по измерительным каналам.

Система ОМСД-02 для контроля буксовых узлов состоит из следующих частей:

- 2 вибропреобразователя AP57 (AP1057) ООО «Глобал Тест», г. Саров;
- 2 усилителя заряда ОСА-8 ООО «ДиаТех», г. Нижний Новгород;
- 2 кабеля антивибрационных АК10 (AK04) – 8 м;
- кабель ПО 084.20.01.000;
- измерительный прибор системы (далее – ИПС);
- программное обеспечение «Вариант 2» (OMSDCLIENT).

ИПС состоит из системного блока ПЭВМ, в который вставляется плата АЦП L-791 либо L-761 фирмы «L-Card», монитора SVGA, клавиатуры и манипулятора «мышь» [5].

Диагностирование подшипников буксовых узлов проводится на стендах: СВ-01П, СВБП-01 или УДП-2001.

При контроле буксовых узлов КП системой ОМСД-02 может применяться как стационарный, так и переносной (за счет магнита с вибропреобразователем и др. способами) съем виброакустических сигналов. На Белорусской железной дороге применяется стационарный (аналогичный установке УДП-2001СМ) съем виброакустических сигналов с пластин звукопроводов, на которые устанавливается диагностируемая букса.

Диагностирование позволяет выявить следующие дефекты:

- повышенное биение КП (дисбаланс КП);
- повреждения сепаратора;
- дефекты тел качения;
- износ тел качения;
- дефекты наружного кольца;
- повреждения поверхностей катания (коррозия, шелушение поверхности катания);
- дефекты внутреннего кольца;
- износ внутреннего кольца;
- недостаток смазки или плохое ее качество [6].

Сигнал, выдаваемый вибропреобразователем пьезоэлектрическим AP57 (AP1057), по кабелю антивибрационному АК10 (AK-04) подается на вход усилителя ОСА-8, где он усиливается и нормируется в величинах напряжения, пропорциональных амплитуде виброускорения. Усилитель заряда ОСА-8 сконструирован с учетом совместного применения с вибропреобразователем, работающим в качестве источника заряда.

С усилителя заряда по кабелю ПО 084.20.01.000 напряжение подается на вход АЦП типа L-791, производства фирмы «L-Card» (входящему в состав ИПС), где преобразуется в цифровой код и передается на компьютер. В компьютере, под управлением программного обеспечения «Вариант 2», значение цифрового кода преобразуется в СКЗ виброускорения и отображается на экране монитора. Опрос каналов (при наличии в составе системы более одного канала) осуществляется последовательно.

Управление системой осуществляется ИПС, имеющим в своем составе ПЭВМ с тактовой частотой процессора не менее 1500 МГц, с установленным программным обеспечением, работающим в среде Windows XP/Vista, СУБД MS SQL Server 2008, оперативную память объемом не менее 256 Мб, накопитель на жестких магнитных дисках объемом не менее 40 Гб, привод для работы с накопителями на гибких магнитных дисках, устройство для чтения компакт дисков CD-ROM.

Структурная схема системы ОМСД-02 приведена на рис. 5.

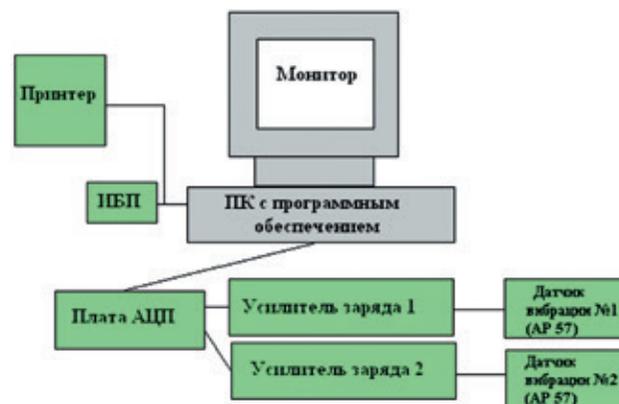


Рис. 5. Схема ОМСД-02

Программное обеспечение системы «Вариант 2» выполняет следующие функции:

- вывод на монитор ИПС измеренного значения СКЗ виброускорения;
- ввод действительных значений коэффициента преобразования вибропреобразователя и усилителя заряда [3].

Пакет программ «OMSDCLIENT» предназначен для регистрации, обработки, хранения и анализа вибрационных сигналов системы диагностики механизмов ОМСД-02 с целью выявления дефектов и неисправностей деталей и узлов подвижного состава во время

текущих ремонтов на предприятиях железнодорожного транспорта.

В состав программного обеспечения «OMSDCLIENT» включены следующие модули:

- OMSDClient.exe (с файлом OMSDClient.ini) – программа для регистрации, обработки, анализа и хранения вибросигналов, формирования отчетов о техническом состоянии объектов диагностики;
- Sync2008.exe – программа синхронизации данных локального рабочего места и сервера диагностического центра;
- EDDCreg2009.exe – программа настройки подключений к базам данных;
- DBUpdateInstaller.exe – программа для установки обновлений программного обеспечения «OMSDCLIENT»;
- Coefficient.exe (с файлом CulcK_pr.xls) – программа для расчета коэффициента преобразования измеряемых АЦП значений в единицы виброускорения;
- SBD2OMSD.exe – программа для обмена данными с СБД-1. (Программа поставляется только совместно с СБД-1) [7].

Установка пороговых значений уровней вибрации рассчитывается исходя из партии годных деталей за определенный интервал времени. К примеру, берется партия в количестве не менее 40 КП одного типа и

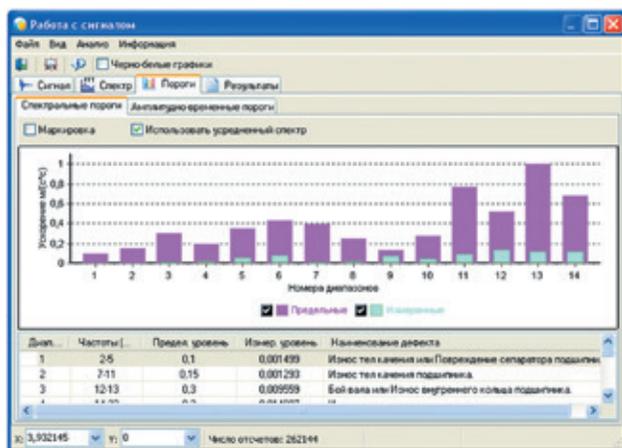


Рис. 6. Значения пороговых и измеренных амплитуд виброускорения

устанавливаются пороговые (предельные) значения амплитуд спектральных составляющих.

КП считается забракованной, если из 3-х измерений два из них покажут на какой-либо дефект [6].

Диагноз по спектру формируется по результатам сравнения амплитуд усредненного спектра с пороговыми значениями. Диагноз по спектру огибающей сигнала формируется по результатам сравнения амплитуд гармонических рядов усредненного спектра огибающей с пороговыми значениями.

На диаграмме порогов по умолчанию всегда отображаются амплитуды виброускорения, рассчитанные по усредненному спектру (рис. 6).

В таблице под диаграммой порогов указана информация о диапазонах и соответствующих им дефектах [8].

По окончании записи автоматически появится окно «Работа с сигналом». Автоматически рассчитанное значение СКЗ вибросигнала будет выведено непосредственно над сигналом (выделено на рис. 7 ниже).

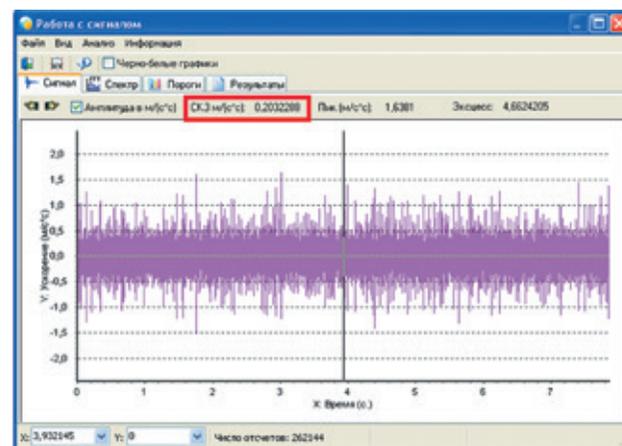


Рис. 7. Значения пороговых и измеренных амплитуд виброускорения

Для проверки работоспособности системы диагностики механизмов ОМСД-02 применяется калибратор АТ01 ООО «Глобал Тест», имеющий среднее квадратичное значение виброускорения $10 \text{ м/с}^2 \pm 2\%$ на частоте 160 Гц. Работоспособность канала АЦП можно проверить при помощи встроенного осциллографа.

Табл. 1. Вибродиагностика подшипников буксовых узлов КП в Гомельском и Жлобинском вагонных депо Белорусской железной дороги

Наименование депо	Оборудование	2022 год						Средний процент забраковки всего объема КП за 6 мес.
		Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	
ВЧД-7 Гомель	УДП-2001	<i>Количество измерений (объем КП, прошедших вибродиагностику)</i>						1,9 %
		308	589	498	449	414	258	
		<i>Количество забракованных колесных пар всего объема измерений</i>						
		2	19	15	9	10	0	
ВЧД-8 Жлобин	ОМСД-02	<i>Количество измерений (объем КП, прошедших вибродиагностику)</i>						2,1%
		1164	1000	1701	1242	1447	922	
		<i>Количество забракованных колесных пар всего объема измерений</i>						
		36	28	48	29	8	11	

Статистика

Рассмотрим в сравнении процент забраковки КП в зависимости от объема ремонта различных ремонтных предприятий (табл. 1).

В соответствии с табл. 1 средний процент забраковки КП за 6 месяцев установкой вибродиагностики УДП-2001СМ составил не более 1,9%. При этом системой ОМСД-02 средний процент забраковки КП за 6 месяцев составил не более 2,1%.

Анализируя табличные данные по забраковке КП, можно говорить, что процент браковки КП на установке УДП-2001СМ не намного, но меньше, чем на системе ОМСД-02. Однако не стоит забывать, что в процент забраковки может входить процент перебраковки КП. При этом на практике подмечено, что увеличение процента перебраковки свойственно установке УДП-2001СМ (особенно в зимний период при соблюдении всех условий контроля в соответствии [2], [9], [10]).

Заключение

Из опыта эксплуатации установки УДП-2001СМ из основных недостатков можно выделить зависимость уровня порога от выявления искусственного дефекта ролика в виде пропила, размеры которого можно считать заведомо большими и ставить под сомнение выявление других дефектов, меньших по раскрытию. Фактически установление порога для КП различных типов должно происходить по контрольному образцу в виде сформированной КП определенного типа, содержащей ролик с дефектом в подшипнике. При переходе с одного типа КП к другому должен устанавливаться порог по контрольному образцу аналогичной КП. Тем самым вибродиагностический контроль становится трудоемким, а наличие различных контрольных образцов по типам ремонтируемых КП не всегда представляется возможным по ряду независимых от этого причин (площадь участка или финансовые затраты и др.).

Сравнивая систему ОМСД-02 с установкой УДП-2001СМ, можно с уверенностью сказать, что программное обеспечение системы ОМСД-02 имеет значительное преимущество в части выявления дефектов на ранней стадии развития. Благодаря статистической обработке результатов измерения вибрации подшипников буксовых узлов, что полностью соответствует руководству [9] и техническим требованиям [10], пороговые значения определяются с большой точностью. При этом в отличие от установки УДП-2001СМ, где устройство может распознать тип дефекта в виде обозначения части подшипника («о» – дефект наружного кольца, «к» – дефект внутреннего кольца, «р» – дефект ролика), система ОМСД-02 более расширенно говорит о характере дефектов деталей подшипника, которые разделены на группы с учетом особенностей их влияния на вибрацию (коррозия, шелушение, износ, перекос и т.д.).

При этом системой можно также обнаружить дисбаланс (биение) КП.

В системе ОМСД-02 порог устанавливается на месте или дистанционно заводом-изготовителем посредством связи с заказчиком при помощи программного обеспечения после прохождения режима наработки КП определенного типа.

В отличие от установки УДП-2001СМ, где сигналы буксовых узлов можно наблюдать в течение 10 секунд на экране пульта в процессе диагностирования, система ОМСД-02 позволяет более детально посмотреть записанный сигнал во времени, провести анализ его спектра, спектра огибающей сигнала, просмотреть пороговые и измеренные значения амплитуд вибрации, СКЗ, процесса, результатов диагностики.

Таким образом, из опыта эксплуатации можно говорить, что система ОМСД-02 хорошо зарекомендовала себя на Белорусской железной дороге и превосходит в качественном показателе работу на установке УДП-2001СМ.

Библиографический список

1. Классификатор дефектов и повреждений подшипников качения «ЦВТ-22». Утвержден ОАО «РЖД» 07.12.2007 г.
2. Руководство по эксплуатации ПЭБ.401722.020РЭ. Установка для вибродиагностики подшипников колесных пар грузовых, рефрижераторных и пассажирских вагонов УДП-2001СМ. Воронеж, 2017. 22 с.
3. Руководство по эксплуатации ПО 086.00.00.000 РЭ. Система диагностики механизмов ОМСД-02. Нижний Новгород, 2007. 20 с.
4. Звягин А.Д., Ваганов А.О., Григорьев А.Н. Вибродиагностика колесных пар вагонов с кассетными подшипниками // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. 2008. № 25. С. 41-53.
5. ПО 086.00.00.000 ФО Формуляр. Система диагностики механизмов ОМСД-02. Нижний Новгород, 2017. 19 с.
6. Методика проверки подшипников и буксовых узлов колесных пар грузовых вагонов системой диагностики механизмов ОМСД-02. Нижний Новгород, 2017. 15 с.
7. ПО 086.00.00.000РП Руководство пользователя Вариант-2 (OMSDCLIENT). Нижний Новгород, 2012. 63 с.
8. Методическое пособие по изучению программного обеспечения измерительной системы «Система диагностики механизмов ОМСД-02». Нижний Новгород, 2016. 57 с.
9. Руководство по вибродиагностике подшипников буксовых узлов вагонных колесных пар (РД 32 ЦВ 109-2011). Утверждено распоряжением ОАО «РЖД» от 04.03.2011 г. №457р. 24 с.
10. Технические требования к комплексам вибродиагностики подшипников буксовых узлов колесных пар грузовых вагонов (№ 741-2011 ПКБ ЦВ). Утверждены распоряжением ОАО «РЖД» от 04.03.2011 г. №457р. 15 с.

References

1. TsVT-22. Rolling bearing defect and damage classifier; 2007. (in Russ.)
2. User manual for PEB.401722.020RE. UDP-2001SM Installation for vibration diagnostics of bearings of freight, refrigerator and passenger car wheels. Voronezh; 2017. (in Russ.)
3. User manual for PO 086.00.00.000 RE. OMSD-02 mechanism diagnostics system. Nizhny Novgorod; 2007. (in Russ.)
4. Zviagin A.D., Vaganov A.O., Grigoriev A.N. [Vibration diagnostics of car wheelsets with case bearings]. *[Dependability and Life in Engineering. Bulletin of the VSAWT]* 2008:41-53. (in Russ.)
5. PO 086.00.00.000 FO Form. OMSD-02 mechanism diagnostics system. Nizhny Novgorod; 2017. (in Russ.)
6. Method for condition monitoring of bearings and axleboxes of freight cars using the OMSD-02 mechanism diagnostics system. Nizhny Novgorod, 2017. (in Russ.)
7. PO 086.00.00.000RP. User Manual. Version-2 (OMSDCIENT). Nizhny Novgorod; 2012. (in Russ.)
8. Guidance manual for learning to use the OMSD-02 mechanism diagnostics system software. Nizhny Novgorod; 2016. (in Russ.)
9. RD32 TsV 109-2011. Manual for vibration diagnostics of axlebox bearings of car wheelsets; 2011. (in Russ.)
10. Technical requirements for vibration diagnostics systems axlebox bearings of freight car wheelsets no. 741-2011 PKB TsV; 2010. (in Russ.)

Сведения об авторах

Отока Александр Генрикович – инженер-технолог (руководитель подразделения неразрушающего контроля) Гомельского вагонного депо РУП «Гомельское отделение Белорусской железной дороги», Гомель, Республика Беларусь, e-mail: otokaa@mail.ru

Будник Денис Вячеславович – начальник лаборатории неразрушающего контроля Жлобинского вагонного депо РУП «Гомельское отделение Белорусской железной дороги», Жлобин, Республика Беларусь, e-mail: bydial@ya.ru

Лях Алексей Михайлович – инженер лаборатории деталей и узлов Могилевского вагонного депо РУП «Могилевское отделение Белорусской железной дороги», Могилев, Республика Беларусь, e-mail: pharmacist009@mail.ru

About the authors

Alexander G. Otoka, Engineering Technologist, Head of Unit for Non-Destructive Diagnostics. Gomel Car Shop, Gomel Division of the Belarusian Railway, Gomel, Republic of Belarus, e-mail: otokaa@mail.ru

Denis V. Budnik, Head of Laboratory for Non-Destructive Diagnostics. Zhlobin Car Shop, Gomel Division of the Belarusian Railway, Zhlobin, Republic of Belarus, e-mail: bydial@ya.ru.

Alexey M. Liakh, Engineer, Laboratory for Parts and Assemblies, Mogilev Car Shop, Mogilev Division of the Belarusian Railway, Mogilev, Republic of Belarus, e-mail: pharmacist009@mail.ru.

Вклад авторов

Отока А.Г. – обзор литературы, описал достоинства и недостатки установки УДП-2001СМ, привел статистические данные о забраковке колесных пар установкой УДП-2001СМ за 6 месяцев 2022 года.

Будник Д.В. – описание достоинства системы диагностики механизмов ОМСД-02 в сравнении с установкой УДП-2001СМ, привел статистические данные о забраковке колесных пар системой ОМСД-02 за 6 месяцев 2022 года.

Лях А.М. – описание технологии проведения вибродиагностического контроля подшипников буксовых узлов колесных пар на установке УДП-2001СМ и системой ОМСД-02. Привел характерные дефекты, подлежащие выявлению при помощи данного диагностического оборудования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Повышение надежности сервоприводов беспилотных летательных аппаратов за счет оптимизации режима работы

Improving the dependability of the servo drives of unmanned aerial vehicles through optimized operating modes

Коробейников И.С.¹, Вырыханов Д.А.^{1*}, Митяев М.В.¹
Korobeynikov I.S.¹, Vyrykhanov D.A.^{1*}, Mityaev M.V.¹

¹Акционерное общество «Конструкторское бюро промышленной автоматики», Саратов, Российская Федерация

¹Industrial Automation Design Bureau, Saratov, Russian Federation

*differentr@mail.ru



Коробейников И.С.



Вырыханов Д.А.



Митяев М.В.

Резюме. Цель. Повышение отказоустойчивости сервопривода за счет отдельного резервирования структурных элементов. **Методы.** В статье применяются методы гармонического анализа, теории надежности технических систем. **Результаты.** Проведено сравнение значений средней наработки до отказа сервоприводов, отличающихся степенью резервирования составляющих их структурных элементов (внешних соединителей, датчиков обратной связи, плат управления, электродвигателей и силовых редукторов). Показано, что резервирование структурных элементов одновременно с обеспечением возможности переключения на оставшиеся в работоспособном состоянии элементы в процессе работы сервопривода позволяет в три раза увеличить устойчивость к отказу. Предложен критерий определения момента времени принятия решения об изменении структуры электропривода до момента отказа резервированного элемента структуры электропривода. **Заключение.** Предлагаемый в статье подход позволяет формализовать порядок изменения структуры электропривода в целях обеспечения требуемого уровня отказоустойчивости.

Abstract. Aim. Improving the reliability of servo drives through partial redundancy of structural components. **Methods.** The paper uses methods of harmonic analysis, technical system dependability theory. **Results.** The mean times to failure of servo drives that differ in terms of the level of redundancy of structural elements (external connectors, feedback sensors, control boards, electric motors and load gears) were compared. It was shown that structural element redundancy along with the capability to switch to still-operable elements in the course of servo drive operation enable a triple increase of the failure tolerance. The authors suggested criteria for identifying the moment of time for decision-making regarding an electric servo's structure modification before the moment of failure of the redundant element of such servo. **Conclusion.** The method suggested in the paper allows formalizing the process of electric servo structure modification for the purpose of ensuring the required level of failure tolerance.

Ключевые слова: сервопривод, надежность, отказоустойчивость, беспилотный летательный аппарат, режим.

Keywords: servo drive, dependability, failure tolerance, unmanned aerial vehicle, mode.

Для цитирования: Коробейников И.С., Вырыханов Д.А., Митяев М.В. Повышение надежности сервоприводов беспилотных летательных аппаратов за счет оптимизации режима работы // Надежность. 2022. №4. С. 16-22. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-4-16-22>

For citation: Korobeynikov I.S., Vyrykhanov D.A., Mityaev M.V. Improving the dependability of the servo drives of unmanned aerial vehicles through optimized operating modes. Dependability 2022;4:16-22. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-4-16-22>

Поступила 28.04.2022 / После доработки 20.10.2022 / К печати 15.12.2022

Received on: 28.04.2022 / Revised on: 20.10.2022 / For printing: 15.12.2022.

Введение

В настоящее время развитие малоразмерной беспилотной авиации (МБА) массой до 2-3 тонн требует создания высоконадежных сервоприводов управления закрылками, элеронами, автоматами перекоса, хвостовыми стабилизаторами; приводов дроссельных заслонок поршневых двигателей и других ответственных систем. В составе системы управления беспилотным летательным аппаратом (БПЛА) сервопривод является ключевым исполнительным звеном, отказ которого приводит к аварийной ситуации, как правило, заканчивающейся гибелью аппарата и невыполнением полетного задания. В этой связи разработка методов снижения вероятности отказа сервоприводных систем управления БПЛА является актуальной научно-практической задачей.

1. Требования, предъявляемые к надежности сервоприводов летательных аппаратов

В соответствии с концепцией электрификации бортовых систем летательных аппаратов, сервоприводы МБА выполняются на базе систем электропривода. Преимуществами электроприводов, по сравнению с распространенными гидравлическими приводами, являются: отсутствие трубопроводов и рабочей жидкости, что уменьшает полетную массу; высокий КПД; высокие динамические характеристики сервопривода вследствие относительно меньшей присоединенной массы движущихся частей.

Основным требованием при создании авиационных сервоприводов является обеспечение вероятности безотказной работы – не менее 0,998 в течение часа полета. Данное требование обеспечивается за счет совершенствования конструкции (структуры) и оптимизации режима работы сервопривода. В настоящее время основным методом повышения надежности технических систем является резервирование ответственных комплектующих: электродвигателя, планетарного редуктора, информационно-силовой платы управления, датчиков угловых координат выходного вала сервопривода и т.д., что приводит к значительному увеличению массогабаритных характеристик. Оптимизировать список резервируемых подсистем сервопривода возможно за счет определения (в том числе прогнозирования) информационной подсистемой технического состояния отдельных составляющих сервопривода и переключения на оставшиеся в работоспособном состоянии. Таким образом, задача обеспечения требуемого уровня надежности сервопривода решается разработкой алгоритма изменения структуры сервопривода в условиях деградации технического состояния его отдельных составляющих, а также в условиях ограничений, накладываемых на массогабаритные, энергетические и информационно-вычислительные параметры.

2. Описание сервопривода дроссельной заслонки авиационного поршневого двигателя АПД-140

В настоящей работе на примере разработки сервопривода дроссельной заслонки авиационного поршневого двигателя АПД-140 приводится сопоставление параметров надежности вариантов конструктивного исполнения сервопривода, разработанных с учетом и без учета возможностей информационной системы принимать решение об оптимальной структуре изделия.

Для частного решения вышеописанной задачи, в рамках проведенных опытно-конструкторских работ была создана конструкция электрической дроссельной заслонки (рис. 1), совмещенная с дублированным электродвигателем, дублированным контроллером управления, дублированным датчиком обратной связи и силовым редуктором. Назначением дроссельной заслонки является изменение проходного отверстия воздухопровода по сигналам электронного регулятора двигателя летательного аппарата – от полностью открытого до полностью закрытого. Дроссельная заслонка должна обеспечивать собственную работоспособность в тяжелых условиях полета БПЛА, характеризующихся наиболее жесткими требованиями по электромагнитной совместимости, молниестойкости, устойчивости к климатическим и механическим воздействующим факторам авиационных агрегатов. В случае полного отказа дроссельной заслонки или потери электропитания в результате аварии системы электроснабжения БПЛА, механизм дроссельной заслонки откроет проходное сечение воздухопровода, обеспечив подачу воздуха в двигатель.

Структурно дроссельная заслонка образует два канала управления положением поворотного элемента (основной и дублирующий), которые, в свою очередь, при частичном отказе составных элементов имеют возможность реализовать реконфигурацию, задействовав работоспособные элементы для создания полноценного канала управления. Например, работоспособный контроллер основного канала может управлять работоспособным двигателем дублирующего канала, используя датчик обратной связи – свой или соседнего канала.

Каждый из каналов принимает команды и передает информацию о своем техническом состоянии по каналам информационного обмена ARINC 429, что обеспечивает высокую помехозащищенность информационного обмена. Также каждый канал контролирует информацию о техническом состоянии соседнего канала, выдаваемую соседним каналом по каналу информационного обмена ARINC 429.

При работе осуществляется непрерывный контроль состояния датчиков тока, температуры, положения вала электродвигателя и поворотного элемента, соответствия математической модели для определения исправности каналов. Также каждым каналом для оценки состояния

соседнего канала осуществляется прием и анализ информации выдаваемой соседним каналом в электронный регулятор управления двигателем по каналу ARINC 429. Контроллер дроссельной заслонки (КДЗ) второго канала обрабатывает информацию с датчиков параллельно с КДЗ основного канала, а также подает управляющие сигналы на электродвигатель (ЭДВ) второго канала, однако сам ЭДВ обесточен. В таком случае переход на управление вторым каналом будет осуществлен намного быстрее, нежели при холодном резервировании КДЗ. В случае отказа одного из датчиков обратной связи (ДОС)

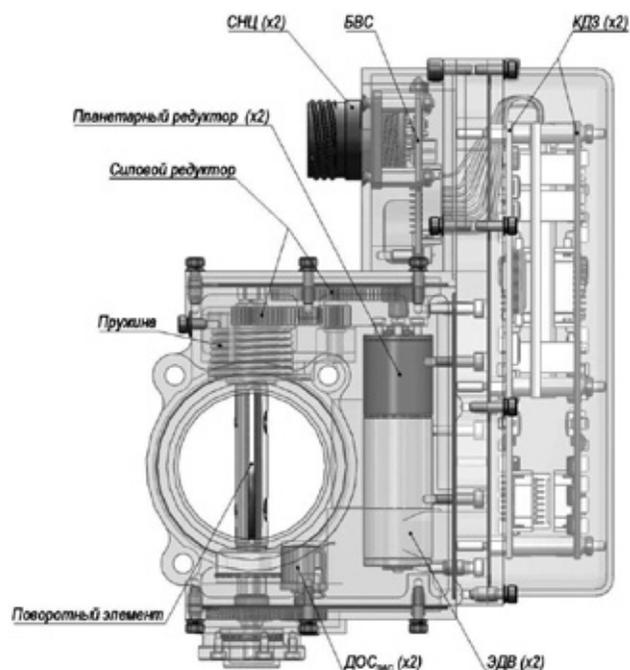


Рис. 1. Конструкция дроссельной заслонки. СНЦ – электрический соединитель; БВС – блок внешних соединителей; КДЗ – контроллер дроссельной заслонки; ЭДВ – электродвигатель; ДОС_{зас} – датчик обратной связи

используется информация с другого, функционирующего в состоянии горячего резерва.

Оценка надежности системы проведена в соответствии с положениями ГОСТ 27.301-95 [1]. В статье приняты следующие предпосылки и допущения:

- времена распределения отказов структурных элементов распределены по показательному закону. Это допущение основывается на том, что исследуемая система в подавляющем большинстве состоит из электронных компонент, поток отказов которых по практическим наблюдениям является простейшим [2];

- отказы структурных составляющих рассматриваемой технической системы взаимно независимы. Это допущение основывается на конструкции БПЛА.

В состав дроссельной заслонки (ДЗ) входят два канала (рис. 2) (основной и резервный) управления положением поворотного элемента, при этом электро-механическая часть находится в холодном резервировании (параллельное ненагруженное соединение), а электронная в горячем (параллельное нагруженное соединение). Пунктирными линиями на рис. 2 показаны возможные изменения в структуре сервопривода, реализуемые согласно результатам контроля работоспособности информационного канала управления, ДОС. Также по результатам программно-аппаратной самодиагностики контроллера возможна передача управления соседнему контроллеру.

3. Анализ показателей надежности сервопривода дроссельной заслонки авиационного поршневого двигателя АПД-140

Сравнение показателей надежности рассматриваемого сервопривода при возможности динамического изменения его структуры и без нее иллюстрируется различием логических схем расчета надежности данных

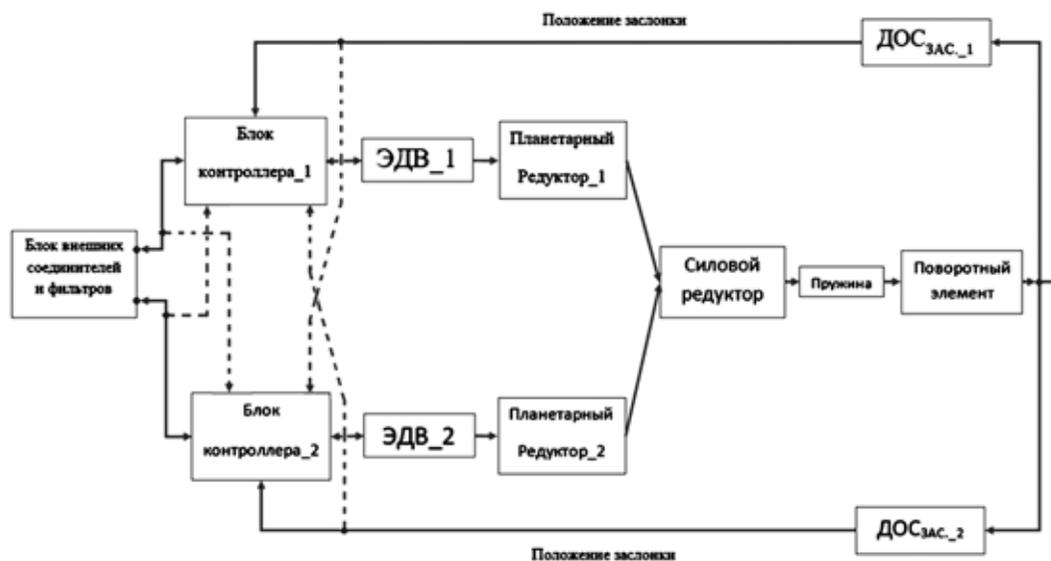


Рис. 2. Структурная схема дроссельной заслонки

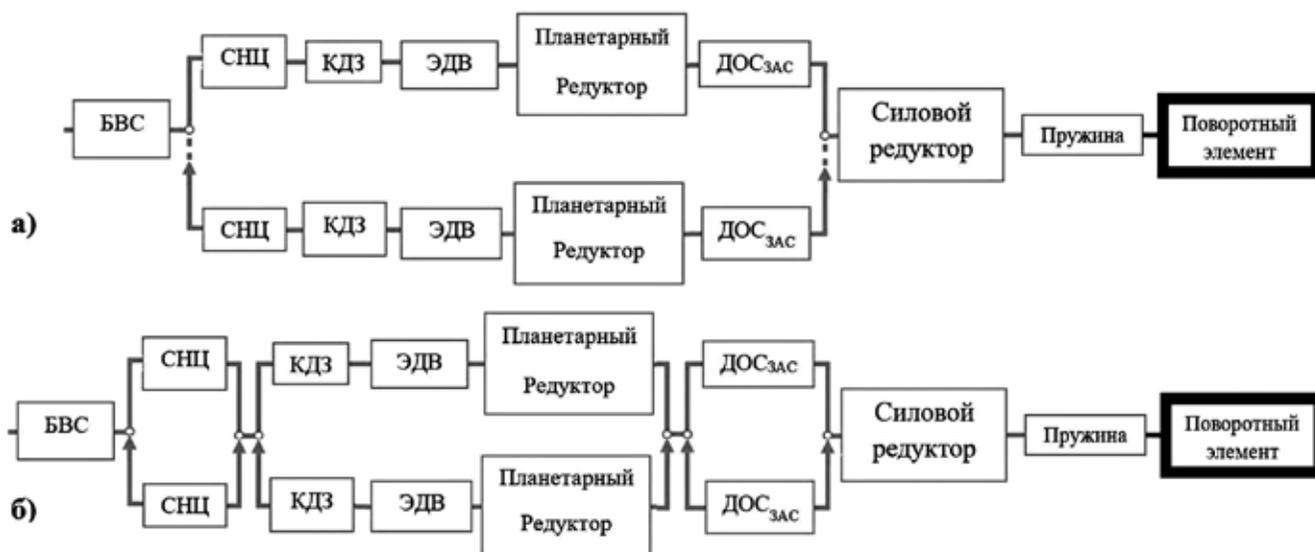


Рис. 3. Варианты схем расчета надежности сервопривода

вариантов, представленных на рис. 3, где обозначено: БВС – блок внешних соединителей, СНЦ – соединитель низкочастотный цилиндрический.

Согласно теории надежности [3, 8] вероятность безотказной работы структурной схемы ДЗ в течение одного часа, при которой отсутствует возможность отдельного резервирования (рис. 3, а) рассчитывается согласно выражению:

$$P_1 = P_{\text{БВС}} \left[1 - (1 - P_{\text{СНЦ}} P_{\text{КДЗ}} P_{\text{ЭДВ}} P_{\text{ПР}} P_{\text{ДОС}})^2 \right] P_{\text{СР}} P_{\text{П}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{БВС}}$ – вероятность безотказной работы блока внешних соединителей; $P_{\text{СНЦ}}$ – вероятность безотказной работы внутренних электрических соединителей; $P_{\text{КДЗ}}$ – вероятность безотказной работы контроллера

дрессельной заслонки; $P_{\text{ЭДВ}}$ – вероятность безотказной работы электродвигателя; $P_{\text{ПР}}$ – вероятность безотказной работы планетарного редуктора; $P_{\text{ДОС}}$ – вероятность безотказной работы датчика обратной связи; $P_{\text{СР}}$ – вероятность безотказной работы силового редуктора; $P_{\text{П}}$ – вероятность безотказной работы возвратной пружины.

Вероятность безотказной работы структурной схемы ДЗ в течение одного часа, при которой возможно осуществление отдельного резервирования (рис. 3, б) рассчитывается согласно выражению:

$$P_2 = P_{\text{БВС}} \left[1 - (1 - P_{\text{СНЦ}})^2 \right] \left[1 - (1 - P_{\text{КДЗ}} P_{\text{ЭДВ}} P_{\text{ПР}})^2 \right] \times \left[1 - (1 - P_{\text{ДОС}})^2 \right] P_{\text{СР}} P_{\text{П}}, \quad (2)$$

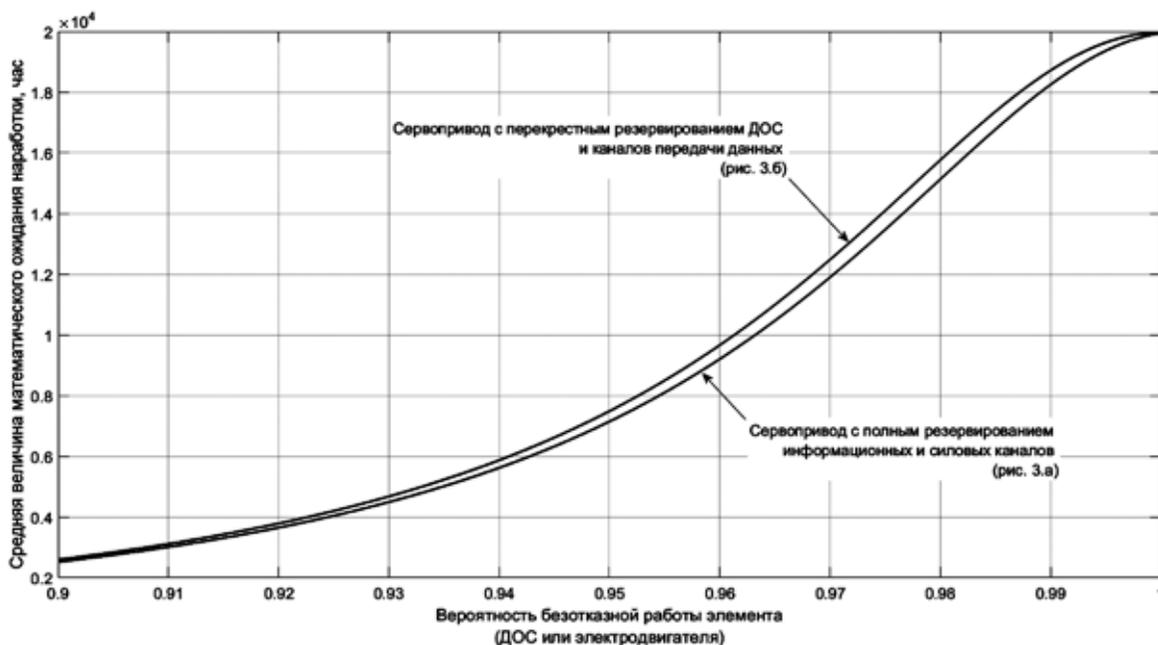


Рис. 4. Зависимость средней величины математического ожидания наработки до отказа вариантов сервопривода с различной структурой резервирования собственных элементов

Подставляя численные значения соответствующих вероятностей [3, 4] в выражения (1), (2) можно сделать вывод о том, что разница между средними значениями математического ожидания наработки до отказа в рассматриваемых вариантах составляет менее $1,0 \cdot 10^{-6}$ часов. При этом не учитывается режим работы сервопривода, определяемый тепловыми, токовыми, силовыми нагрузками, испытываемыми приводом, оказывающими влияние на фактическое состояние структурных составляющих сервопривода и приводящими, при некотором превышении их интегрального воздействия, к аварии. Также, выражения (1), (2) не учитывают процесс переключения сервопривода с вышедшего из строя элемента на резервный элемент конструкции. Данный процесс, в общем случае, должен характеризоваться некоторым показателем безотказности и вносить уточнения в обобщенные показатели надежности сервопривода.

Проведем анализ влияния показателей надежности составляющих структуры сервопривода на среднюю величину математического ожидания наработки изделия до отказа, определяемую согласно выражению:

$$T = 1/\lambda, \quad (3)$$

где λ – интенсивность отказов, определяемая исходя из вероятности $P_{1,2}$ безотказной работы всего изделия (1) или (2):

$$\lambda = -\ln(P). \quad (4)$$

Максимальное значение увеличения средней наработки до отказа наблюдается при определенном значении показателя надежности совершенствуемого элемента, что объясняется структурой уравнений (2), в составе которого присутствуют квадраты выражений содержащих показатель надежности совершенствуемого элемента (ДОС или ЭДВ). Таким образом, выбор оптимального списка резервируемых структурных элементов сервопривода должен происходить с учетом изменения величины его совокупного показателя надежности.

Важным показателем надежности оборудования является параметр отказоустойчивости, заключающийся в способности оборудования сохранять работоспособность после отказа его составляющего. Под величиной отказоустойчивости принимается максимальное число последовательных отказов структурных элементов технической системы, которое не приводит к потере работоспособности изделия.

Сервопривод, обладающий структурой согласно рис. 3, а может пережить только один отказ элементов, включенных в зарезервированный канал: СНЦ, КДЗ, ЭДВ, Планетарный редуктор или ДОС. В случае данного отказа его надежность, отнесенная к часу работы, снизится до значения, определяемого согласно выражению:

$$P_{1,1} = P_{\text{БВС}} P_{\text{СНЦ}} P_{\text{КДЗ}} P_{\text{ЭДВ}} P_{\text{ПР}} P_{\text{ДОС}} P_{\text{СР}} P_{\text{П}}. \quad (5)$$

Сервопривод с возможностью отдельного резервирования (согласно рис. 3, б), обеспечит наиболее быстрое снижение вероятности безотказной работы при последовательном выходе из строя:

а) СНЦ, при этом надежность определится выражением:

$$P_{2,1} = P_{\text{БВС}} P_{\text{СНЦ}} \left[1 - \left(1 - P_{\text{КДЗ}} P_{\text{ЭДВ}} P_{\text{ПР}} \right)^2 \right] \times \left[1 - \left(1 - P_{\text{ДОС}} \right)^2 \right] P_{\text{СР}} P_{\text{П}}, \quad (6)$$

б) ДОС, при этом надежность определится выражением:

$$P_{2,2} = P_{\text{БВС}} P_{\text{СНЦ}} \left[1 - \left(1 - P_{\text{КДЗ}} P_{\text{ЭДВ}} P_{\text{ПР}} \right)^2 \right] P_{\text{ДОС}} P_{\text{СР}} P_{\text{П}}. \quad (7)$$

в) КДЗ, ЭДВ или Планетарного редуктора, при этом надежность определится согласно выражению (5), то есть $P_{2,3} = P_{1,1}$.

Таким образом, при обеспечении отдельного резервирования, несмотря на относительно незначительное увеличение среднего значения математического ожидания наработки до отказа, обеспечивается возможность максимально увеличить глубину отказоустойчивости в три раза: с одного переживаемого отказа до 3-х возможных отказов.

Реализация оптимального режима работы электропривода требует определения момента времени изменения структурной схемы за счет введения в работу элементов, находящихся в резерве. Как правило, в электроприводах авиационного применения данный момент времени определялся по факту выхода из строя электродвигателя, ДОС, СНЦ или иного элемента из списка зарезервированных (рис. 3, б). При этом наблюдается кратковременный нештатный режим работы электропривода в течение времени переключения, а вышедший из строя элемент уже невозможно вернуть в рабочее состояние. Повысить вероятность безотказной работы системы электропривода предлагается за счет прогнозирования технического состояния электропривода, в целях выявления предаварийного режима работы. В качестве технологии оценки фактического состояния электропривода были использованы методы оценки спектральных составляющих режимных параметров [5–7]. В качестве критерия оценки фактического состояния электропривода K предлагается использовать степень изменения разности начальных углов фаз вторых гармоник акустического шума, издаваемого системой электропривода, и функции суммарного тока, потребляемого электродвигателем:

$$K = \int_{v_n}^{v_k} (\phi_{0,эл.2} - \phi_{0,ак.2}) dv, \quad (8)$$

где v – угловая скорость вращения вала электродвигателя; v_n, v_k – начальное и конечное, соответственно, значение угловой скорости вращения вала электродвигателя; $\phi_{0,эл.2}$ – начальный угол сдвига фазы второй гармониче-

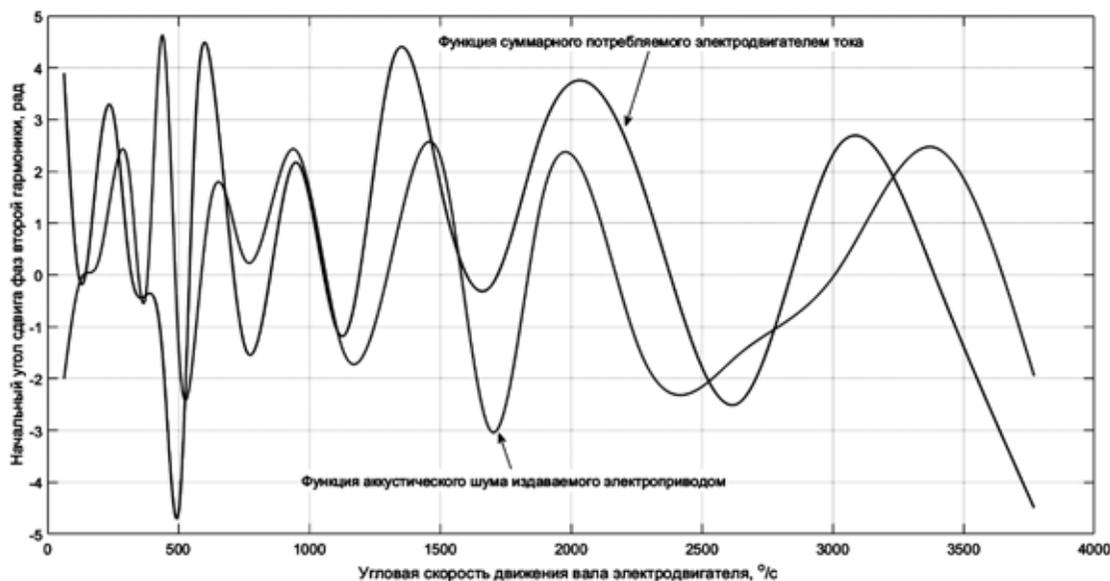


Рис. 5. Изменение начального угла сдвига фаз второй гармонической составляющей функций потребляемого электродвигателем тока и издаваемого им акустического шума в штатном режиме

ской составляющей разложения функции потребляемого электродвигателем тока $i(t)$ в ряд:

$$i(t) = I_1 \sin(\omega_{эл.1}t + \phi_{0.эл.1}) + I_2 \sin(\omega_{эл.2}t + \phi_{0.эл.2}), \quad (9)$$

где I_1, I_2 – амплитуды, соответственно, первой и второй гармоники функции тока $i(t)$; $\omega_{эл.1}, \omega_{эл.2}$ – частоты, соответственно, первой и второй гармоники функции тока $i(t)$; $\phi_{0.эл.1}, \phi_{0.эл.2}$ – начальные углы сдвига фаз, соответственно, первой и второй гармоники функции тока $i(t)$; $\phi_{0.ак.2}$ – начальный угол сдвига фазы второй гармоники функции $\gamma(t)$ колебаний пьезодатчика, прикрепленного к корпусу электропривода, определяющей звуковые колебания, издаваемые электроприводом, при разложении данной функции в следующий ряд:

$$\gamma(t) = \Upsilon_1 \sin(\omega_{ак.1}t + \phi_{0.ак.1}) + \Upsilon_2 \sin(\omega_{ак.2}t + \phi_{0.ак.2}), \quad (10)$$

где Υ_1, Υ_2 – амплитуды, соответственно, первой и второй гармоники функции колебаний пьезодатчика $\gamma(t)$; $\omega_{ак.1}, \omega_{ак.2}$ – частоты, соответственно, первой и второй гармоники функции колебаний пьезодатчика $\gamma(t)$; $\phi_{0.ак.1}, \phi_{0.ак.2}$ – начальные углы сдвига фаз, соответственно, первой и второй гармоники функции колебаний пьезодатчика $\gamma(t)$.

Экспериментальные исследования показали, что в штатном режиме работы электропривода разность между начальными углами сдвига фаз вторых гармоник функций $i(t)$ и $\gamma(t)$ имеет явно выраженный минимум, что иллюстрируется на рис. 5. При этом первая гармоника данных функций не обладает данным свойством, что согласуется с источником [9], в котором в качестве критерия оценки наличия дефектов (трещин) в изделии при акустико-эмиссионном контроле предлагается использовать отношение амплитуд второй и первой гармоник регистрируемого акустического сигнала. В аварийном режиме работы соотношения между рассматриваемыми

углами $\phi_{0.эл.2}$ и $\phi_{0.ак.2}$ нарушаются, при этом, учитывая, что вторая гармоника функции $i(t)$ определяется частотой питающего обмотки электродвигателя напряжения с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ), достигая величины 50 кГц, то регистрация предаварийного режима становится возможной на прогнозной величине нескольких периодов колебаний ШИМ, то есть порядка 100...200 мкс.

На основании приведенных положений, в отношении сервопривода дроссельной заслонки, разработанной силами АО «Конструкторское бюро промышленной автоматики» (ГК Ростех. г. Саратов), были предложены наиболее целесообразные меры к обеспечению высоких показателей надежности, в том числе:

- мониторинг фактического состояния обоих ДОС, с анализом адекватности поступающих от них информации, с алгоритмическим переключением на оставшийся в рабочем состоянии ДОС;
- мониторинг целостности каналов передачи данных от системы управления заслонкой, с переключением на оставшийся в работоспособном состоянии канал;
- мониторинг фактического состояния системы электропривода, согласно оценке величины параметра K в соответствии с (8).

Выводы

В результате расчета показателей надежности сервоприводных систем показано преимущество построения сервоприводов с отдельным резервированием собственных структурных элементов по показателю глубины отказоустойчивости.

Предложен метод оценки фактического состояния электропривода, а также критерий регистрации момента времени изменения структуры электропривода, в целях обеспечения заданной глубины отказоустойчивости.

Библиографический список

1. ГОСТ 27.301-95. Надежность в технике. Расчет надежности. Основные положения. Введ. 1997-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1995. 13 с.
2. Шубинский И.Б. Структурная надежность информационных систем. Методы анализа. М.: Журнал «Надежность», 2012. 212 с.
3. Анищенко В.А., Колосова И.В. Основы надежности систем электроснабжения. Минск: БНТУ, 2007. 151 с.
4. ОСТ 1 00132-97. Надежность изделий авиационной техники. Методы количественного анализа безотказности функциональных систем при проектировании самолетов и вертолетов Введ. 1998-07-01. М.: Изд-во стандартов, 1997. 69 с.
5. Петухов В.С., Соколов В.А. Диагностика состояния электродвигателей. Метод спектрального анализа потребляемого тока // Новости электротехники. 2005. № 1 (31). С. 50–52.
6. Петухов В.С. Диагностика электродвигателей. Спектральный анализ модулей векторов Парка тока и напряжения // Новости электротехники. 2009. № 3 (57). С. 47–51.
7. Токарев Р.О., Шапошников В.В., Чабанов Е.А. Способы диагностики электрических машин // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: материалы всерос. науч.-практ. конф. (г. Пермь, 9–11 июня 2020) в 2 т. Пермь, Изд-во Перм. нац. ис-следов. политехн. ун-та, 2020. Т. 2. С. 93–99.
8. Теория вероятностей / А.В. Печинкин, О.И. Тескин, Г.М. Цветкова и др.; под ред. В.С. Зарубина, А.П. Крищенко. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 456 с.
9. Глебович С.А. Управление отказоустойчивостью при оценке технического состояния компенсаторов трубопровода // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. № 10. С. 58–63.

References

1. GOST 27.002-95. Dependability in technics. Dependability prediction. Basic principles. Moscow: Izdatelstvo Standartov; 1995. (in Russ.)
2. Shubinsky I.B. [Structural dependability of information systems. Analysis methods]. Moscow: Dependability Journal; 2012. (in Russ.)
3. Anishchenko V.A., Kolosova I.V. [Introduction to the dependability of power supply systems: a study guide for higher education establishments]. Minsk: BNTU; 2007. (in Russ.)
4. OST 1 00132-97. [Dependability of aviation equipment. Methods for quantitative analysis of the reliability of functional systems in the process of airplane and helicopter design]. Moscow: Izdatelstvo standartov; 1997. (in Russ.)
5. Petukhov V.S., Sokolov V.A. [Electric motor condition diagnostics. Method for spectrum analysis of the consumption current]. *Novosti elektrotehniki* 2005;1(31):50-52. (in Russ.)

6. Petukhov V.S. [Electric motor diagnostics. Spectrum analysis of Park's vector values of current and voltage]. *Novosti elektrotehniki* 2009;3(57):47-51. (in Russ.)

7. Tokarev R.O., Shaposhnikov V.V., Chabanov E.A. [Methods for electric machine diagnostics]. In: [Proceedings of the All-Russian Research and Practice Conference Automated Control Systems and Information Technology]. Perm: Perm State University Publishing; 2020. Pp. 93-99. (in Russ.)

8. Pechinkin A.V., Teskin O.I., Tsvetkova G.M. et al. Zarubin V.S., Krishchenko A.P., editors. [Probability theory]. Moscow: Bauman MSTU Publishing; 2004. (in Russ.)

9. Glebovich S.A. [Managing failure tolerance as part of evaluation of the technical condition of pipeline compensators]. *Izvestiya TulGU: Tekhnicheskie nauki* 2015;7(1):134-139. (in Russ.)

Сведения об авторах

Коробейников Илья Сергеевич – начальник отдела электромеханизмов, Акционерное общество «Конструкторское бюро промышленной автоматики», Саратов, Российская Федерация, e-mail: korobeynikovilya@mail.ru

Вырыханов Денис Александрович – кандидат технических наук, инженер-системотехник, Акционерное общество «Конструкторское бюро промышленной автоматики», Саратов, Российская Федерация, e-mail: differentr@mail.ru

Митяев Максим Васильевич – ведущий инженер, Акционерное общество «Конструкторское бюро промышленной автоматики», Саратов, Российская Федерация, e-mail: m.v.mityaev@mail.ru

About the authors

Ilya S. Korobeynikov, Head of Unit for Electrical Mechanisms, Industrial Automation Design Bureau, Saratov, Russian Federation, e-mail: korobeynikovilya@mail.ru

Denis A. Vyrykhanov, Candidate of Engineering, Systems Engineer, Industrial Automation Design Bureau, Saratov, Russian Federation, e-mail: differentr@mail.ru

Maxim V. Mityaev, Lead Engineer, Industrial Automation Design Bureau, Saratov, Russian Federation, e-mail: m.v.mityaev@mail.ru

Вклад авторов в статью

Коробейников И.С. – формулировка описания объекта исследования, определены параметры надежности элементов дроссельной заслонки, принято участие в расчетах приведенных в статье.

Вырыханов Д.А. – расчет и анализ параметров надежности дроссельной заслонки, полученных в статье.

Митяев М.В. – разработка структурных схем определения показателей надежности дроссельной заслонки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Технология пескоструйной обработки кремниевой пластины при изготовлении полупроводниковых транзисторов

Process for sandblasting silicon slabs as part of semiconductor transistor manufacture

Шахмаева А.Р.¹, Кардашова Г.Д.¹, Казалиева Э.^{1*}, Евдулов Д.В.¹
Shakhmaeva A.R.¹, Kardashova G.D.¹, Kazalieva E.^{1*}, Yevdulov D.V.¹

¹Дагестанский государственный технический университет, Махачкала, Российская Федерация

¹Dagestan State Technical University, Makhachkala, Russian Federation

*kazanova.em@mail.ru



Шахмаева А.Р.



Кардашова Г.Д.



Казалиева Э.



Евдулов Д.В.

Резюме. Цель. Целью работы является разработка технологии обработки обратной стороны кремниевых пластин и получение рельефа поверхности пластин для хорошей адгезии к напыляемым металлам с равномерной толщиной и с отсутствием механических напряжений, трещин и сколов. Поставленная цель достигается предварительной подготовкой поверхности пластин перед напылением контактных материалов методом пескоструйной обработки поверхности с использованием в качестве абразивного материала карбида кремния (SiC) с размером частиц песка не более 6 мкм. **Методы.** Предложенный метод пескоструйной обработки способствует улучшению качества посадки кристалла за счет исключения появления напряженности поверхности, образования микротрещин и кристаллитов в структуре кристалла. Исследования проводились с использованием установки пескоструйной обработки с проведением контроля на электронном микроскопе. **Результаты.** Показано, что нанесение металлов при формировании контакта к коллекторной области транзисторной структуры после проведения пескоструйной обработки улучшает адгезию поверхности полупроводниковой подложки. При этом не появляются механические напряжения и микротрещины по сравнению с процессами шлифовки, полировки и химобработки, которые обычно проводят перед созданием контакта операциями сборки транзистора к корпусу. **Выводы.** Технология напыления тонких пленок металла в процессе изготовления полупроводниковых приборов влияет на надежность их работы. Обработка и подготовка обратной стороны кремниевых пластин с готовыми транзисторными структурами являются одними из ключевых операций технологического процесса изготовления транзистора, влияющими на адгезионные свойства поверхности перед напылительными процессами, выходные характеристики полупроводникового прибора, выход годных изделий, себестоимость.

Abstract. Aim. The paper aims to develop a process for treating the back side of silicon slabs and giving them a surface texture that enables good adhesion with printed metal with an even thickness and no mechanical stress, cracks or chipping. That is achieved by sandblasting slabs before contact material application. Silicon carbide (SiC) with particle size not exceeding 6 μm is used as the abrasive material. **Methods.** The proposed method of sandblasting improves chip bonding by eliminating surface stress, formation of microcracks and crystal grain within the chip. The research was conducted using a sandblaster and electronic microscope. **Results.** It was shown that, after sandblasting, metal coating in the process of transistor collector area contact delineation improves the adhesion of the substrate semiconductor. Additionally, no mechanical stress was observed as compared to grinding, polishing and chemical treatment that are normally done before transistor contact encapsulation. **Conclusions.** The process of thin metal film evaporation as part of semiconductor-based device manufacture affects their dependability. The treatment and preparation of the back side of the silicon slab with finished transistor configurations is one of the key operations as part of transistor manufacturing process that affects the adhesive properties of the surface before evaporation, output characteristics of the semiconductor-based devices, yield and cost.

Ключевые слова: пескоструйная обработка, кремниевая пластина, адгезия, надежность, кристалл, транзистор, карбид кремния.

Keywords: sandblasting, silicon slab, adhesion, dependability, chip, transistor, silicon carbide.

Для цитирования: Шахмаева А.Р., Кардашова Г.Д., Казалиева Э., Евдулов Д.В. Технология пескоструйной обработки кремниевой пластины при изготовлении полупроводниковых транзисторов // Надежность. 2022. №4. С. 23-27. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-4-23-27>

For citation: Shakhmaeva A.R., Kardashova G.D., Kazalieva E., Yevdulov D.V. Process for sandblasting silicon slabs as part of semiconductor transistor manufacture. Dependability 2022. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-4-23-27>

Поступила 17.09.2022 / После доработки 24.10.2022 / К печати 15.12.2022
Received on: 17.09.2022 / Revised on: 24.10.2022 / For printing: 15.12.2022.

Введение

В технологии изготовления полупроводниковых транзисторов, при формировании металлизации к коллекторной области, обычно для улучшения адгезии к поверхности обратной стороны кремниевой структуры используются такие методы механической обработки, как шлифовка и полировка, но эти методы часто способствуют образованию «напряженной поверхности», микротрещин. В процессе формирования структуры прибора такие дефекты способствуют возникновению паразитных емкостей в изготавливаемом приборе, а появление более глубоких трещин может вызвать сколы отдельных участков и все это, в свою очередь, приводит к ухудшению выходных характеристик и надежности работы прибора.

Для повышения адгезии поверхности полупроводниковых пластин с сформированной структурой полупроводниковых приборов часто используют химическую обработку различными травителями. Одним из таких методов химической обработки является метод с использованием в качестве полировки химических растворов или растворов щелочей калия и натрия [1].

При использовании этих способов в кристаллической решетке полупроводника появляются нежелательные примеси с последующим образованием кристаллитов за счет химических реакций, что приводит к ухудшению электрофизических параметров и характеристик прибора [2–3].

Задачей данного исследования является улучшение адгезии поверхности кремниевых транзисторных структур для формирования качественной металлизации к коллекторной области транзистора методом пескоструйной обработки с целью улучшения качества посадки кристалла за счет исключения появления напряженности поверхности, образования микротрещин и кристаллитов в структуре кристалла.

Методика эксперимента

Для проведения процесса пескоструйной обработки использовалась установка DBS-200 с функцией выработки струи песка, направляемой на обратную сторону полупроводниковой пластины, с готовыми структурами транзистора, закрепленными на вращающем столе установки. При этом задавалась скорость вращения стола и скорость подачи абразивного материала из пескоструйного сопла.

Процесс проводят при следующих технологических режимах: частота вращения стола – 22 ± 2 об/мин, время проведения процесса – $6 \pm 0,5$ минут, давление подава-

емого воздуха – $2,6 \pm 0,2$ кг/см². В случае если скорость вращения стола с пластинами более 22 об/мин, то на поверхности возникают микротрещины, а при частоте вращения стола менее 22 об/мин и меньшем давлении подаваемого воздуха адгезионные свойства ухудшаются. Этим обусловлен выбор вышеуказанных технологических режимов. По окончании процесса останавливают подачу абразива и сопла и после полной остановки стола выгружают пластины в кассету. Остатки с поверхности полупроводниковых пластин удаляются раствором фтористоводородной кислоты [4–7].

В качестве абразивного материала был выбран песок из карбида кремния с размером частиц не более 6 мкм.

Металлизация коллекторной области транзисторных структур недостаточно исследована в научных литературных источниках, в связи с чем исследование технологии обработки обратной стороны пластины с готовой структурой транзистора для качественной адгезии напыляемых металлов предоставляет большой интерес [8–9].

Результаты и их обсуждение

Для металлизации обратной стороны полупроводниковых пластин со структурами транзисторов, обработанными пескоструйным способом, в исследованиях была выбрана четырехслойная композиция металлов: хрома, никеля, олова и серебра; металлизация проводилась магнетронным напылением с применением установки LEYBOLD AGZ-600. При этом контролировались следующие параметры оборудования: скорость движения полета, мощность катода, давление вакуума в камере [10–11].

Толщина пленки металлов измерялась профилометром марки Alpha-Step.

При проведении экспериментов для определения технологических режимов получения заданных толщин металлов контролировались следующие параметры процесса: скорость движения подноса с пластинами, давление вакуума в камере и мощность катода с металлом.

На установке магнетронного распыления были установлены соответствующие катоды, рассчитанные на следующие мощности: из хрома – 2 кВт, из никеля – 10 кВт, из олова – 2 кВт, из серебра – 4 кВт.

До процесса напыления производилась предварительная очистка поверхности пластин в блоке плазматравления установки. Время предварительной очистки составило 1 мин. Расход аргона – $200 \dots 220$ см³/ч, давление вакуума в камере 5×10^{-3} мбар.

Результат экспериментов и анализ данных показал, что для создания надежного контакта и отвода тепла

от коллекторного перехода полупроводниковых транзисторов на обратной стороне пластин необходимо сформировать послойную металлизацию из четырех металлов за один технологический цикл. Выбраны оптимальные толщины каждого слоя металла, которые обеспечивают надежное качество монтажа кристалла на основание рамки: первый слой – хром с толщиной $650 \pm 50 \text{ \AA}$, второй слой – никель с толщиной $5500 \pm 500 \text{ \AA}$, третий слой – олово с толщиной $700 \pm 250 \text{ \AA}$, четвертый слой – серебро с толщиной $4500 \pm 500 \text{ \AA}$.

Сочетание напыляемых слоев обеспечивает получение надежного контакта к коллекторной области при посадке кристалла на основание корпуса, что приводит к уменьшению сопротивления омического перехода [12-13].

Согласно экспериментально полученным данным толщина слоя из пленок металлов также зависит от задаваемых значений мощности катода и скорости движения подноса с пластинами. Чем больше мощность катода и меньше скорость подноса с пластинами, тем больше толщина пленки (возрастает) и наоборот, чем меньше мощность катода и больше скорость движения подноса с пластинами, тем меньше толщина пленки металла (уменьшается).

В этих условиях выбран интервал значений, при которых мощность катода не превышает 50% от максимально возможной.

Скорость движения подноса с пластинами выбрана оптимальной, при которой получается качественное напыление с минимальными затратами времени на процесс.

Для проверки надежности и точности адгезии четырехслойной металлизации «хром – никель – олово – серебро» обратной стороны пластин применялся наиболее распространенный метод контроля – процарапывание металлической иглой. Контроль адгезии четырехслойной металлизации показал отличное качество адгезии, игла проскальзывала по поверхности контролируемой пластины.

Согласно технологии, после проведения металлизации обратной стороны была проведена посадка кристалла на основание корпуса.

При проведении процесса сборки кристаллов транзистора качество посадки контролировалось методом отрыва с определенным усилием и визуально под микроскопом. При проведении контроля посадки кристалла с четырехслойной металлизацией кристалл не отрывается от основания при приложении соответствующего усилия, и при приложении большего усилия разламывается сам кремний. Это объясняется тем, что посадка кристалла на основание – качественная. При визуальном контроле под рентгеновским микроскопом со всех сторон кристалла по периметру проступал припой на 0,5–1,0 мм от края, что показывает удовлетворительное распределение припоя по всей площади кристалла (рис. 1). Кроме того, контроль площади распределения припоя по основанию кристалла с помощью рентгеновского

микроскопа показал 100% распределение припойного слоя по площади кристалла без повреждений и трещин, что улучшает термодинамические свойства прибора. Контроль выходных характеристик показал увеличение процента выхода годных приборов на 5,5% [14–15].



Рис. 1. Посадка кристалла на основание корпуса

Заключение

В работе показана возможность воспроизводимого технологического процесса формирования методом пескоструйной обработки поверхности кремниевой подложки областей, в которых нанопоры равномерно заполняются послойно металлами в кристаллической фазе. Такая технология обеспечивает получение на поверхности пластин хорошей адгезии поверхности к напыляемым металлам, равномерной по толщине, с разбросом толщины по поверхности $0,5 \text{ мкм} \pm 5\%$ без механических напряжений, кристаллитов и микротрещин.

Способ может быть применен при производстве полупроводниковых приборов и микросхем.

Библиографический список

1. Никифорова-Денисова С.Н. Технология полупроводниковых приборов и изделий микроэлектроники. В 10 книгах. Книга 4. Механическая и химическая обработка. М.: Высшая школа, 1989, 96 с.
2. Шахмаева А.Р., Шангереева Б.А., Алиев Ш.Д. Метод удаления кристаллитов с поверхности кремниевой пластины // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2004. Т. 47. № 7. Спец. вып. С. 63-65.
3. Способ обработки подложек в жидкостном травителе: пат. 2419175 Рос. Федерация. № 2009124736/28 / Исмаилов Т.А., Саркаров Т.Э., Шангереева Б.А., Шахмаева А.Р.; заявл. 29.06.2009; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1. 4 с.
4. Способ обработки поверхности кремниевых пластин: пат. 2352021 Рос. Федерация. № 2007127110/28 / Исмаилов Т.А., Шахмаева А.Р., Шангереева Б.А.; заявл. 16.07.2007; опубл. 10.04.2009, Бюл. № 10. 3 с.
5. Sandblasting agent, wafer treated with the same, and method of treatment with the same: Pat. EP 1053831 A1 EU. No. 99970350.7 / Otaka T. Fukami T.; Date of filling 12.10.1999; Date of publication 22.11.2000, Bull. 2000/47. 8 p.
6. Method of removing impurities on a grinding surface of a semiconductor wafer, equipment of removing impurities on a grinding surface of a semiconductor wafer,

process of manufacture of semiconductor wafer, process of manufacture of semiconductor chip and semiconductor device: Pat. P2008-85016A Japan. No. P2006-262-057 / Hozawa K.; Date of filling 27.09.2006; Date of publication 10.04.2008. 15 p.

7. Method for microstructuring solid surfaces: Pat. DE 102006003604 A1 Germany. No. 102006003604.2 / Mayer K., Kray D., Baumann S., Kolbesen B.; Date of filling 25.01.2006; Date of publication 23.11.2006. 5 p.

8. Исмаилов Т.А., Шахмаева А.Р. Методы моделирования, технологии и конструкции приборов микроэлектроники. СПб.: Политехника, 2019. 292 с.

9. Технология изготовления транзисторных структур силовой электроники / Исмаилов Т.А., Шахмаева А.Р., Саркаров Т.Э., Шангереева Б.А. // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2016. № 1. Т. 40. С. 31-37.

10. Исмаилов Т.А., Шахмаева А.Р., Шангереева Б.А. Технология наноразмерных слоев металлов для формирования надежного контакта к стоковой области кремниевых транзисторов // Микроэлектроника. 2020. Т. 49. № 6. С. 409-412.

11. Методы монтажа кристаллов при производстве кремниевых транзисторных структур / Исмаилов Т.А., Шахмаева А.Р., Саркаров Т.Э., Шангереева Б.А. // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2020. Т. 63. № 1. С. 61-69. DOI: 10.17586/0021-3454-2020-63-1-61-69

12. Шахмаева А.Р., Казалиева Э. Технология монтажа кристаллов полупроводниковых приборов // Приоритетные направления развития науки и технологий: доклады XXVIII международной научно-практической конференции, 12 марта 2021 г. Тула, 2021. С. 164-166.

13. Способ формирования контакта к стоковой области полупроводникового прибора: пат. 2534439 Рос. Федерация. № 2013100562/28 / Исмаилов Т.А., Шахмаева А.Р., Захарова П.Р.; заявл. 09.01.2013; опубл. 20.07.2014, Бюл. № 14. 4 с.

14. Исмаилов Т.А., Шахмаева А.Р., Шангереева Б.А. Исследование параметров, влияющих на пробивное напряжение биполярного транзистора со статической индукцией // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2017. № 2. С. 23-27.

15. Шахмаева А.Р., Казалиева Э. Исследование физических процессов на границе раздела металл-полупроводник // Сборник материалов XLI итоговой научно-технической конференции преподавателей, сотрудников, аспирантов и студентов ДГТУ, 13-18 апреля 2020 г. Махачкала, 2020. С. 108.

References

1. Nikiforova-Denisova S.N. [Semiconductor and electronics technology. In 10 volumes. Book 4. Mechanical and chemical treatment]. Moscow: Vysshaya Shkola, 1989. (in Russ.)

2. Shakhmayeva A.R., Shangereeva B.A., Aliev Sh.D. [Method for removing crystallites from the surface of a silicon slab]. *Journal of Instrument Engineering* 2004;47(7);63-65. (in Russ.)

3. Ismailov T.A., Shakhmayeva A.R., Sarakatov T.E., Shangereeva B.A. [Method for treating substrates with a liquid etcher]. Russian patent no. 2419175; 2009. (in Russ.)

4. Ismailov T.A., Shakhmayeva A.R., Shangereeva B.A. [Method for treating the surface of silicon slabs]. Russian patent no. 2352021; 2009. (in Russ.)

5. Toshiaki O., Teruaki F. Sandblasting agent, wafer treated with the same, and method of treatment with the same. Pat. 1053831A1 EU; 2000.

6. Hozawa K. Method and device for removing impurity on ground surface of semiconductor wafer, method for manufacturing semiconductor wafer and semiconductor chip, and semiconductor device. Pat. 200885016A JP; 2008.

7. Mayer K., Kray D., Baumann S., Kolbesen B. Method for microstructuring solid surfaces. Pat. WO2006097241A1 WIPO; 2006.

8. Ismailov T.A., Shakhmayeva A.R. [Simulation methods, processes and designs of microelectronic devices]. Saint-Petersburg: Politekhnik; 2019. (in Russ.)

9. Sarkarov T.E., Shangereeva B.A., Shakhmaeva A.R. Technology of manufacturing of transistor structures power electronics. *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences* 2016;40(1):31-37. (in Russ.)

10. Ismailov T.A., Shakhmayeva A.R., Shangereeva B.A. [Technology of nanodimensional layers of metal for a reliable contact with the drain area of silicon transistors]. *Mikroelektronika* 2020;49(6):409-412. (in Russ.)

11. Ismailov T.A., Shakhmayeva A.R., Sarkarov T.E., Shangereeva B.A. [Methods of chip mounting in the process of silicon transistor manufacture]. *Journal of Instrument Engineering* 2020;63(1):61-69. DOI 10.17586/0021-3454-2020-63-1-61-69.

12. Shakhmayeva A.R., Kazaliyeva E. [Process of chipping in semiconductor devices]. In: [Proceedings of the XXVIII International Research and Practice Conference Priority Focus Areas of Science and Technology]. Tula; 2021. Pp. 164-166. (in Russ.)

13. Ismailov T.A., Shakhmayeva A.R., Zakharova P.R. [Method for drain part contact delineation in a semiconductor device]. Russian Patent no. 2344339; 2014. (in Russ.)

14. Ismailov T.A., Shakhmayeva A.R., Shangereeva B.A. [Research of the parameters that affect the breakdown voltage of bipolar-mode static induction transistors]. *Journal of the Russian Universities. Radioelectronics* 2017;2:23-27. (in Russ.)

15. Shakhmayeva A.R., Kazaliyeva E. [Research of physical processes at the metal-semiconductor interface]. In: [Proceedings of the XLI Concluding Research and Engineering Conference of the Teachers, Members, Postgraduate and Undergraduate Students of the DSTU]; 2020. P. 108. (in Russ.)

Сведения об авторах

Шахмаева Айшат Расуловна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры теоретической и общей электротехники Дагестанского государственного технического университета, пр. И. Шамиля, 70, Махачкала, Российская Федерация, 367015, e-mail: fpk12@mail.ru.

Кардашова Гюльнара Дарвиновна – кандидат физико-математических наук, Дагестанского государственного технического университета, пр. И. Шамиля, 70, Махачкала, Российская Федерация, 367015, e-mail: fpk12@mail.ru.

Казалиева Эльмира – аспирант кафедры теоретической и общей электротехники Дагестанского государственного технического университета, пр. И. Шамиля, 70, Махачкала, Российская Федерация, 367015, e-mail: kazanova.em@mail.ru.

Евдулов Денис Викторович – кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры теоретической и общей электротехники Дагестанского государственного технического университета, пр. И. Шамиля, 70, Махачкала, Российская Федерация, 367015, e-mail: 79634051239@yandex.ru.

About the authors

Ayshat R. Shakhmayeva, Candidate of Engineering, Associate Professor, Senior Lecturer, Department of Theoretical and General Power Engineering, Dagestan State Technical University, 70 Imama Shamilia ave., 367015, Makhachkala, Russian Federation, e-mail: fpk12@mail.ru.

Gulnara D. Kardashova, Candidate of Physics and Mathematics, Dagestan State Technical University, 70 Imama Shamilia ave., 367015, Makhachkala, Russian Federation, e-mail: fpk12@mail.ru.

Elmira Kazaliyeva, postgraduate student, Department of Theoretical and General Power Engineering, Dagestan State Technical University, 70 Imama Shamilia ave., 367015, Makhachkala, Russian Federation, e-mail: kazanova.em@mail.ru.

Denis V. Yevdulov, Candidate of Engineering, Associate Professor, Senior Teacher, Department of Theoretical and General Power Engineering, Dagestan State Technical University, 70 Imama Shamilia ave., 367015, Makhachkala, Russian Federation, e-mail: 79634051239@yandex.ru.

Вклад авторов в статью

Автором **Шахмаевой А.Р.** был предложен способ пескоструйной обработки кремниевой пластины для улучшения адгезионных свойств поверхности полупроводниковой подложки.

Автором **Кардашовой Г.Д.** были подобраны абразивные материалы (карбид кремния) и рассчитан размер песочного материала для обработки кремниевой подложки.

Автором **Казалиевой Э.** были рассчитаны технологические режимы и проведены экспериментальные исследования.

Автором **Евдуловым Д.В.** была изготовлена установка для пескоструйной обработки и подобраны предварительные режимы обработки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Феномен доверия как фактор надежности в авиации

The phenomenon of trust as a factor of reliability in aviation

Красильников Г.Т.^{1*}, Крачко Э.А.¹, Мальчинский Ф.В.¹
Krasilnikov G.T.^{1*}, Krachko E.A.¹, Malchinsky F.V.¹

¹Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова, Краснодар, Российская Федерация

¹Hero of the Soviet Union A.K. Serov Krasnodar Higher Aviation School of Pilots, Krasnodar, Russian Federation

*gennadykras@mail.ru



Красильников Г.Т.



Крачко Э.А.



Мальчинский Ф.В.

Резюме. Цель. В данной статье на основании анализа литературных источников в отечественных и зарубежных публикациях выводится оценка влияния феномена доверия в авиации на безопасность и надежность полетов. Доверие является многофункциональным феноменом, который сравнительно недавно появился в отечественной научной психологии (середина 1990-х гг.), и вскоре стал предметом исследований во многих науках. Феномен доверия в научной психологии считается категорией повышенной сложности в связи с его высокой динамичностью и многофакторной зависимостью. Объектами доверия могут выступать отдельные люди, социальные группы и организации, а также различные явления материального и нематериального мира. Феномен доверия принято подразделять на доверие к себе, доверие к людям (социальное) и доверие к миру. **Методы.** Проведен анализ 49 источников тематической литературы, включающих статьи в научных журналах – 25, статьи в сборниках научных работ – 8, монографии – 15, авторефераты диссертаций – 1; из них труды отечественных авторов – 37, иностранных авторов – 12 научных трудов. **Результаты.** Прослежено формирование доверия в онтогенезе и его влияние на развитие личности в последующей жизни. Большое значение имеет базовое доверие, которое формируется в младенчестве в диаде взаимоотношений мать-ребенок и в последующем определяет жизненную позицию, существенно влияющую на социализацию и развитие личности, поведение человека в личной жизни и профессиональной деятельности. Проведен анализ структуры феномена доверия (когнитивный, эмоциональный, поведенческий аспекты), его феноменологии и социально-психологических функций. Установлено, что феномен доверия имеет важное значение в различных сферах жизни и деятельности отдельных людей и организаций, проявляясь в этических, социально-психологических, экономических, юридических и политических функциях. Рассмотрена возможность приложения установленных при исследовании феномена доверия положений к авиации. Выявлено, что уровень доверия в системах авиации (гражданской и военной) оказывает влияние на безопасность полетов. Особую важность имеет доверие в деятельности летчика, поскольку оказывает влияние на его адаптационные возможности при возникновении профессиональных экстремальных ситуаций. **Заключение.** Обоснована оценка феномена доверия в качестве фактора надежности деятельности авиационных систем. Наряду с этим устанавливается влияние доверия личности летчика на адаптацию и устойчивость к стрессу в условиях экстремальных ситуаций. Поэтому логично рассмотрение личностного доверия пилота как противострессового личностного ресурса. Следовательно, целесообразно продолжение исследований в направлении установления значения профессионального доверия летчика для повышения надежности полетов.

Abstract. Aim. Based on an analysis of Russian and foreign literary sources, the paper deduces an estimation of the effect of trust in aviation on the safety and reliability of flights. Trust is a multifunctional phenomenon that appeared in the Russian scientific psychology relatively recently (in the mid-1990s) and soon became an object of research in many branches of science. The phenomenon of trust in scientific psychology is a high-complexity category due to its highly dynamic nature and multifactorial dependence. Objects of trust might include individuals, social groups and organisations, as well as various material and non-material phenomena. The phenomenon of trust is conventionally subdivided into self-trust, trust in people (social) and trust in the world. **Methods.** 49 specialised literary sources were analysed. Those include papers in science journals (25), papers in proceedings (8), monographs (15), abstracts of theses (1), out of which 37 are by Russian and 12 are by foreign authors. **Results.** The development of trust was traced through the ontogeny, its effect on personality development throughout life was identified. Of great importance is the basic trust that burgeons in the infancy within the mother – child diad and later defines the view of life that significantly affects the

*socialization and personality development, behaviour in personal life and professional activities. The phenomenon of trust (cognitive, emotional, behavioural aspects), its phenomenology and psychosocial functions were analysed. It was established, that the phenomenon of trust is of significant importance in many spheres of life and activities of individuals and organisations. It is manifested in the ethical, psychosocial, economic, legal and political functions. The authors examine the applicability of the identified properties of trust in aviation. It was identified that the level of trust in aviation systems (civilian and military) affects flight safety. Of special importance is the trust in pilot operations, as it affects his/her adaptive capability in cases of professional emergencies. **Conclusion.** The paper substantiates the evaluation of the phenomenon of trust as a factor of reliability of an aviation system's operation. At the same time, the effect of trust in the pilot on the adaptation and stress tolerance in emergency situations is identified. It is logical to consider personal trust of a pilot as a personal antistress resource. Consequently, the research should continue in order to identify the value of a pilot's professional trust for the purpose of improving flight safety.*

Ключевые слова: безопасность полетов, феномен доверия – структура и функции, базисное доверие, доверие к себе, доверие в организациях, доверие в авиации.

Keywords: flight safety, phenomenon of trust, the structure and functions, basic trust, self-trust, trust in organisations, trust in aviation.

Для цитирования: Красильников Г.Т., Крачко Э.А., Мальчинский Ф.В. Феномен доверия как фактор надежности в авиации // Надежность. 2022. №4. С. 28-36. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-4-28-36>

For citation: Krasilnikov G.T., Krachko E.A., Malchinsky F.V. The phenomenon of trust as a factor of reliability in aviation. *Dependability* 2022;4:28-36. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-4-28-36>

Поступила 13.08.2022 / **После доработки** 19.10.2022 / **К печати** 15.12.2022

Received on: 13.08.2022 / **Revised on:** 19.10.2022 / **For printing:** 15.12.2022.

Введение. Несмотря на непрерывное совершенствование авиационной техники, проблема надежности и безопасности полетов сохраняет актуальность и привлекает интерес исследователей [1-8]. Согласно статистическим данным последних десятилетий, по причине человеческого фактора происходят от 50% до 90% летных происшествий [9, 10]. Под профессиональной надежностью летчика понимается безошибочное и стабильное выполнение заданных функций в течение определенного времени в любых условиях профессиональной деятельности [9, 11]. Причем под человеческим фактором подразумеваются не только ошибки летчика, но и ошибочные действия органов управления и обеспечения полетов. В научной литературе последнего времени активно обсуждается влияние феномена доверия на эффективность деятельности субъектов и организаций. Доверие присутствует во всех сферах личной и общественной жизни, поэтому имеет много аспектов своего рассмотрения. Понятие «доверие» отражает сложный многофункциональный феномен, который сравнительно недавно вошел в обиход отечественной научной психологии (середина 1990-х гг.), и вскоре стал предметом исследований во многих социо-гуманитарных науках [12]. Нам не встретилось исследований, посвященных влиянию феномена доверия на профессиональную деятельность в авиации. Однако при обращении к доверию оказывается, что при кажущейся самоочевидности и простоте его содержания оно отличается значительной неоднозначностью. А само понятие доверия в научной психологии считается категорией повышенной слож-

ности в связи с его высокой динамичностью и многофакторной зависимостью [12, 13]. Феномен доверия принято подразделять на доверие к себе, доверие к людям (социальное) и доверие к миру. Поэтому возникла необходимость провести предварительный теоретический анализ содержания и функций феномена доверия, чтобы установленные при исследовании положения приложить к профессиональной авиационной деятельности.

Методы. Проведен анализ 49 источников тематической литературы, включающих статьи в научных журналах – 25, статьи в сборниках научных работ – 8, монографии – 15, авторефераты диссертаций – 1; из них труды отечественных авторов – 37, иностранных авторов – 12 научных трудов.

Результаты и обсуждение. Сущность доверия имеет глубоко психологическую природу и служит основой как отношений между людьми, так и взаимодействия человека с миром в целом и даже с самим собой. Однако исследователи по-разному определяют доверие, считает Е.П. Ильин [13]. Д. Роттер определял доверие в человеческих взаимоотношениях как обобщенные ожидания человека относительно того, насколько можно положиться на слова, обещания другого человека или группы людей [14]. По Т.П. Скрипкиной, в качестве основополагающих признаков доверия современные исследователи выделяют эмоциональную близость, социальную идентичность, моральные добродетели, ролевые ожидания, договорные обязательства. А в основе доверия рассматриваются базовые потребности человека в совместности, общности, а также социаль-

ные потребности в сотрудничестве и кооперации [15]. В.П. Зинченко считает, что один из главных источников доверия – вещи, которые нас окружают, ибо им не доверять трудно [16]. И.В. Антоненко подчеркивает универсальность наличия доверия во всех формах жизнедеятельности человека и определяет его тотальным феноменом современного общества [17]. Объектами доверия могут выступать отдельные люди, как носители определенных социальных ролей, социальные группы и организации, а также различные феномены и явления материального и нематериального мира [18, 19].

Доверие следует отличать от сходных по звучанию, но отличающихся по смыслу феноменов – вера и доверчивость. **Вера** – это признание чего-либо истинным, без предварительной фактической или логической проверки, как твердое убеждение в чем-то при отсутствии доказательств. Доверию в отличие от веры желательны основания, доказательства, проверка. Веру, понимаемую не только в религиозном смысле, а широко, можно обнаружить во всех видах деятельности человека, когда существует не критическое отношение к событиям, теориям, предписаниям и даже вымыслам, при котором они принимаются за достоверные без доказательства. Доверие включает в себя и ответственность, как знание того, кому можно доверять. Если же доверие к другим людям, к получаемой информации происходит без необходимых доказательств, то это проявление доверчивости. **Доверчивость** – это личностная черта человека принимать сведения на веру без критического обдумывания или анализа, наивность, неизменная готовность верить словам и обещаниям окружающих. Доверчивость возникает на основе непонимания мира, его устройства, идеализации, неспособности определить неправду, дезинформацию. Доверчивость выше у лиц с такими психологическими особенностями, как наивность, внушаемость, конформность, сниженная критичность, инфантильность личности [15, 16, 20].

Формирование доверия в раннем периоде онтогенеза исследовано американским психологом Э. Эриксоном. Он выделил доверие как базовую установку личности к миру, которая формируется с раннего младенчества. Показателем проявления доверия может служить готовность ребенка без особой тревоги переносить исчезновение матери из поля зрения. Это базовое доверие как жизненная позиция становится основой отношения к миру людей. Она начинает формироваться с первых месяцев жизни в симбиотической системе «мать-ребенок». Модель отношения к людям вытекает от взаимодействий с матерью, через идеализацию родителей, проходит этапы: привязанность – доверие – независимость. При безответственном, ненадежном и не любящем родителе у ребенка, напротив, может возникнуть чувство базовой тревоги, которое является противоположным доверию. Это общая установка ребенка – фундамент отношения к себе и к другим людям, который позволяет пережить состояние фрустрации на следующих стадиях развития [21, 22].

Большинство исследователей проблемы также рассматривают доверие как социально-психологический феномен по своему генезу [13, 15, 20, 23, 24]. Чувство доверия появляется в психике человека очень рано, в том детском возрасте, о котором человек ничего не помнит. Столь раннее появление феномена, который впоследствии накладывает печать на всю жизнь человека, нередко производит впечатление генетической предопределенности.

На основе базового доверия/недоверия развивается жизненная позиция ребенка («объектные отношения», по психоанализу), которая формируется до 5-летнего возраста, а далее она только модифицируется и сохраняется на протяжении всей жизни [25, 26, 27, 28, 29]. Жизненная позиция – это экзистенциальный жизненный выбор, это основные убеждения человека о себе и о других людях. В понятиях трансактной психологии выделяется четыре основных варианта жизненных позиций, в соответствии с которыми человек строит свои отношения с окружающим миром [25]. Это следующие жизненные позиции в модели трансактных отношений доверия (+) / недоверия (–) к себе и к людям – Я и Они: 1) Я+, Они+ (конструктивная); 2) Я+, Они– (оборонительная); 3) Я–, Они+ (депрессивная); 4) Я–, Они– (бесплодная). В первой жизненной позиции человек доверяет себе и миру; вторая позиция нарциссическая – доверие только к себе при недоверии к миру людей; третья позиция – недоверие к себе, пассивность; четвертая позиция – низкий уровень доверия к себе и к миру [25, 27, 28]. Жизненная позиция индивида во взаимодействии с другими людьми проявляется в социальной позиции личности, в убеждениях, ценностных ориентациях, установках и мотивах деятельности личности [28, 30]. Следует учитывать, что человек непостоянно пребывает в своей базовой экзистенциальной позиции. Под влиянием жизненного опыта она адаптивно модифицируется и скрывается под различными ситуативными масками. Но базовая позиция всегда проявляется в трудных жизненных ситуациях, в новых, неожиданных обстоятельствах, особенно в экстремальных ситуациях, когда маски срываются и проявляется «базовая позиция» как «истинное лицо» человека.

Поскольку доверие является регулятором человеческих взаимоотношений, то оно может быть отнесено к области нравственных категорий, как установка личности [14, 31]. В психологическом же плане оно выступает многоуровневым образованием и складывается из неосознаваемого доверия, исходящего от базисной жизненной позиции раннего детства, что переживается как интуиция; и из сознательного доверия, основанного на жизненном опыте (доверяй, но проверяй). Сознательная и бессознательная части доверия соотносятся как и аналогичные соотношения в других областях психики. При феноменологическом подходе к анализу в структуре доверия выявляются когнитивный, эмоциональный и поведенческий компоненты. Когнитивный компонент есть логическое обоснование своего отношения и включает представления

о себе, о втором участнике доверительных отношений и об условиях взаимодействия. Эмоциональный компонент характеризуется эмоциональными оценками взаимодействующих сторон и самого процесса взаимодействия. Поведенческий компонент включает готовность к определенным действиям в отношении второго участника, в отношении самого себя и сложившихся условий [15]. В значительной своей части доверие представлено эмоциональной частью психики и поэтому плохо поддается рефлексивной вербализации. Оно способно порождать многие другие чувства (от любви до ненависти), состояния (от комфорта до фрустрации), социальные установки (от принятия до отторжения) [16].

По объектной направленности в психологии принято выделять три относительно самостоятельных, но в то же время взаимосвязанных вида доверия: базовое доверие к миру, доверие к другим людям и доверие к себе [13, 14, 15, 16, 20, 23]. Так, С. Кови выделял следующие варианты доверия: доверие к себе; доверие во взаимоотношениях (как межличностных, так и профессиональных); доверие в организации (как к системе, так и к процессам); общественное доверие в целом [23].

Основой для формирования этих видов доверия является «базальное доверие», описанное Э. Эриксонем [21]. А С. Кови считает, что первым уровнем, из которого произрастают остальные виды доверия, является доверие к самому себе. Доверие к себе основано на уверенности человека в своих возможностях, а также компетенции человека ставить себе цели и достигать их, соблюдать свои обязательства, которые ранее взял на себя [23].

По Т.П. Скрипкиной, доверие к себе – как рефлексивный, субъектный феномен личности, позволяющий человеку занять определенную ценностную позицию по отношению к самому себе, к миру; причем доверие человека к миру и к себе постоянно находятся в состоянии подвижного равновесия [20, 31]. Е.П. Ильин под доверием к себе полагает доверие своей интроспекции, своим ощущениям, восприятию, памяти, своим интерпретациям, как убежденность человека в своем собственном совершенстве, безусловная вера в свои силы, собственную значимость. На эмоциональном уровне доверие к себе переживается как самопринятие, создающее ощущение защищенности, что раскрепощает человека, позволяет открыто выбирать цели собственной деятельности и не бояться вступать во взаимодействие с миром [13]. Исследованиями установлено, что мера выраженности системы доверительных отношений к себе и к другим влияет на степень толерантности к стрессу и уровень адаптационных возможностей человека [31, 32]. В экстремальной ситуации доверие может выступать фактором повышения адаптационных возможностей личности, что установлено на примере военнослужащих в зоне военных действий, мигрантах и вынужденных переселенцах, у которых кризис доверия выступает фактором дезадаптации в новых условиях [15, 32].

Доверие к миру, согласно Эриксону, является базой, которая формируется одновременно с другой фундаментальной установкой, направленной на доверие к себе. Другими словами, с одной стороны, доверие направлено на мир, а с другой – на себя. Доверие к миру как базовая ценностно-смысловая установка личности выполняет в жизни человека фундаментальные функции и является одним из механизмов социализации личности. Доверие к миру является двухполюсной установкой, связанной как с ценностным отношением к различным сторонам мира, в том числе и к другим людям, так и с ценностным отношением личности к себе самому. Доверие к миру как базовая ценностно-смысловая установка личности выполняет в жизни человека фундаментальные функции и является одним из механизмов социализации личности [13, 14, 20, 23].

Доверие к другим людям подразделяется на межличностное доверие, основанное на личном опыте субъекта, и обобщенное доверие, как мировоззренческая установка готовности индивида к доверительному общению [15, 33]. Социальное доверие между индивидами трактуется психологами как исходное условие общения, как отправная точка взаимодействия человека с миром. Багаж накопленного личностного доверия представляет форму индивидуального капитала человека, а в социуме – социального капитала общества.

Рассмотрим разнообразные функции, которые просматриваются у доверия в различных областях жизни. Доверие в организациях в современных исследованиях рассматривается как фактор эффективности работы организации. Неслучайно доверие стало рассматриваться в качестве основы важного организационного ресурса – социального капитала. Доверие является одним из важных факторов эффективности внутренней и внешней деятельности любой организации. Исследователи выделяют две основные функции доверия в организации – повышение эффективности и развития; создание комфортных условий для сотрудников и как прямое следствие – рост их приверженности организации. Организации, в которых доверие является основополагающим принципом, обеспечивают самые благоприятные условия для профессионального роста сотрудников и использования ими инноваций [20, 34, 35, 36]. Особенно высокое значение доверие в организациях приобретает в эпоху цифровых технологий, когда происходит трансформация доверия личностного характера к институциональному, а затем и цифровому доверию [33, 37].

Анализ доверия на макросоциальном уровне показывает важность влияния доверия на благосостояние экономики страны. Так, страны с высоким уровнем общего доверия отличаются высоким уровнем жизни, социальной стабильностью и, наоборот, в странах с низким уровнем жизни и социальной нестабильностью отмечается снижение общего доверия [13, 37, 38, 39, 40]. Успешность проведения Россией специальной военной операции на Украине основывается на высоком доверии

власти со стороны общества в этом аспекте внешней политики. Различные отношения между странами строятся, в значительной степени основываясь на том, какой уровень доверия между ними. Так доверие выступает в функциях экономической и политической категорий. Распространенное использование доверия в официальных документах придает ему юридический смысл. Привычными стали выражения: вотум доверия, доверенное лицо, рейтинг доверия; а «утрата доверия» стала новой юридической категорией, когда президент РФ отправил мэра Москвы в отставку с формулировкой – «в связи с утратой доверия». В нашем обществе снизился градус социального доверия. Упало доверие к официальной информации, к СМИ, к освещению событий и новостей. В печатных публикациях и телевизионных передачах зачастую научная мистика подается под видом достижений передовой науки. В СМИ без всяких пояснений астрологический прогноз подается однопорядково с прогнозом погоды. Во всем мире отмечается снижение доверия к науке, к научным авторитетам [41, 42]. Эта тенденция начинает проникать из общественной жизни и в сугубо профессиональные области. Например, в медицине, где уже по определению отношения на всех уровнях должны строиться на основе доверия, в действительности наблюдается резкое снижение доверия к официальной медицине, к медицинским авторитетам. Нередки обращения пациентов даже с серьезными заболеваниями к услугам нетрадиционной медицины, целителям, экстрасенсам [43, 44]. Так, по данным М.М. Решетникова, объем теневого финансового оборота в сфере нетрадиционной медицины сопоставим с бюджетом министерства здравоохранения [43]. Общеизвестны важность взаимного доверия врача и больного, но важны и доверие врачей друг другу, и общества к медицине, к рекомендациям. От этого в существенной степени зависит и уровень общественного здоровья, что имеет уже не только медицинское и социально-психологическое, но и экономическое значение.

Существуют профессиональные области, где на доверии основывается не только эффективность деятельности организации, но и постоянно поддерживается даже сама жизнь человека. К таковой профессиональной области относится авиация, где деятельность в авиационных коллективах основывается на доверительных общественных отношениях, а работа каждого авиационного специалиста служит, в конечном счете, обеспечению полета летчика. Внешне кажется, что в авиации летчик находится на вершине организационной пирамиды, а на самом деле он реализует результат труда тысяч людей, что возможно на основе взаимного доверия, считает А.В. Пономаренко [45]. Поэтому доверие в авиации имеет особенно важное значение. Исторически сложилось так, что авиация в мире подразделяется по целевому предназначению на военную и гражданскую авиацию. В каждой из этих областей авиации существуют различающиеся системы опознавания и доверия. В военной авиации очень важно подразделять летательные

аппараты на вызывающие доверие (свои) и не вызывающие, потенциально враждебные (чужие). Для этого существует система радиолокационного опознавания («свой-чужой»), представляющая аппаратно-программный технический комплекс для автоматического различения своих войск и вооружений от войск противника.

Гражданская авиация регулируется Международной организацией гражданской авиации (ИКАО от англ. ICAO – International Civil Aviation Organization), которая является специализированным учреждением ООН. Она устанавливает международные нормы гражданской авиации и координирует ее развитие с целью повышения эффективности и безопасности полетов. Из-за непрерывного роста числа авиоперевозок и участников воздушного движения международная аэронавигационная система становится все более сложной, что вызывает все более широкое использование цифровой авиационной инфраструктуры и услуг. Для обеспечения бесперебойной международной трансграничной авиационной деятельности необходима разработка структуры доверия. В этих целях в структуре ИКАО в 2019 г. была создана Исследовательская группа по механизму доверия. Эта группа ведет разработку политики и инструктивного материала для глобального и интероперабельного авиационного механизма доверия, который обеспечит обмен надежной информацией между всеми существующими сторонами в единой цифровой среде [46]. Важной задачей является разработка в структуре доверия способов изоляции доверительной коммуникации в авиационном сообществе от публичного Интернета.

Во время полета летчик с необходимостью доверяет множеству факторов профессиональной деятельности: прежде всего – себе и членам экипажа, преподавателям, обучавшим летному мастерству, конструктору и заводскому исполнению летательного аппарата, летчику-испытателю, который проводил испытание данной модели самолета в критических режимах полета, инженерно-техническому составу, готовившему самолет к вылету, группе руководителей полета. В авиационном коллективе работа каждого авиационного специалиста в конечном счете служит обеспечению полета летчика. Инженеры и техники готовят самолет к полету, врачи контролируют состояние здоровья летчика, метеорологи информируют об окружающей среде, в которой осуществляется полет, связисты обеспечивают связь с пунктами управления, диспетчеры, руководители полетов – контроль за воздушным пространством и управление с Земли, аэродромно-технические работники – благоприятные условия для взлета и посадки. Со всеми этими людьми летчик взаимодействует, и от них, от качества их работы зависит благополучный исход его полета [8, 47]. Можно считать, что полет является результатом целеустремленных усилий большого числа ответственных за этот полет специалистов.

Доверие к самому себе близко по экзистенции к самооценке, к уверенности в себе, но обращено вектором к чувству безопасности, собственной надежности.

В большей степени представлено бессознательным аспектом, от позиции базисного доверия [48]. Доверие к внеличностной внешней профессиональной среде более сознательно. Переживание доверия как на интуитивном (неосознаваемом), так и на сознательном уровне увеличивает у летчика чувство безопасности и расширяет свободу выбора в различных ситуациях полета. Доверие к себе существенно связано с летной успешностью. У летчика при сниженном доверии к себе (и сниженной самооценке) в обычных условиях могут быть достигнуты профессиональные успехи за счет компенсации усиленными тренировками. Но при развитии серьезной экстремальной ситуации влияние компенсации ослабевает и обнажается базисная позиция недоверия, что ведет к повышению тревоги, неуверенности в себе, развитию стрессового состояния. В таких условиях профессиональное доверие смягчает действие инстинкта самосохранения, неуверенности, повышает уровень стрессоустойчивости у специалиста [32, 47, 49].

Профессиональное доверие летчика в процессе профессионального обучения формируется в определенной последовательности. На первом этапе представлено только доверие к себе и минимум – к профессиональной среде. Доверие к себе основано на бессознательной базисной установке жизненной позиции и осознаваемом опыте предшествующей жизни. В самом начале воспитания профессионализма формируется осознание необходимости неукоснительного выполнения летных правил, положений и инструкций, что возможно на основе полного доверия к преподавателям. На последующих этапах обучения, по мере овладения профессией, возрастает осознаваемое профессиональное доверие к себе и к факторам профессиональной среды [47]. Соотношение интуитивной части доверия и осознаваемой, а также предметной составляющей доверия может широко варьировать у разных курсантов.

Выводы. Проведенный анализ тематической литературы показал большую структурную и функциональную сложность феномена доверия. Установлено, что феномен доверия имеет важное значение в различных сферах жизни и деятельности отдельных людей и организаций, проявляясь в этических, социально-психологических, экономических, юридических и даже политических функциях. Рассмотрена возможность приложения установленных при исследовании феномена доверия положений к области авиации. Обоснована оценка феномена доверия в организации в качестве фактора надежности деятельности авиационных систем. Наряду с этим устанавливается влияние профессионального доверия летчика на адаптацию и устойчивость к стрессу в условиях экстремальных ситуаций. Поэтому логично рассмотрение личностного доверия пилота как противострессового личностного ресурса. Следовательно, целесообразно продолжение исследований в направлении установления значения профессионального доверия летчика для повышения надежности полетов.

Библиографический список

1. Ариничева О.В., Малишевский А.В. Исследование соционических характеристик мужчин и женщин для повышения надежности профессионального психологического отбора авиационных специалистов // Надежность. 2021. №1. С. 45-54. DOI: 10.21683/1729-2646-2021-21-1-45-54.
2. Золотых В.И. Об уровнях авиационной системы и структуре системы безопасности полетов авиационной воинской части // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2019. № 11. С. 15–23.
3. Концепция безопасности полетов авиации Вооруженных Сил Российской Федерации. Утв. МО РФ 31.05.2017 г. М.: СБП А ВС РФ, 2017. 19 с.
4. Красильников Г.Т., Крачко Э.А., Мальчинский Ф.В. Разработка методики прогностической оценки устойчивости к профессиональному информационному стрессу летного состава // Российский психологический журнал. 2021. Т. 18. № 1. С. 47–60. DOI: 10.21702/грj.2021.1.4
5. Надежность прогноза успешности летного обучения по данным профессионального психологического отбора / Э.А. Крачко, Г.Т. Красильников, Ф.В. Мальчинский С.Л. Хвостова // Надежность. 2018. Т. 18. № 3. С. 27–30. DOI: 10.21683/1729-2646-2018-18-3
6. Лапа В.В., Пономаренко В.А., Чунтул А.В. Психология безопасности полетов. М.: МОО «Ассоциация журналистов, пишущих на правоохранительную тематику», 2013. 396 с.
7. Плотников Н.И. Основания теории надежности человека-оператора (пилота) // Надежность. 2015. № 2 (53). С. 90-93. DOI: 10.21683/1729-2646-2015-0-2-90-97
8. Пономаренко В.А. Безопасность полета – боль авиации. М.: Флинта, 2007. 416 с.
9. Благинин А.А. Психологический анализ ошибочных действий летного персонала // Образование и наука. 2009. № 6. С. 74–81.
10. Пономаренко В.А. Психология человеческого фактора в опасной профессии. Красноярск: Поликом, 2006. 629 с.
11. Козлов В.В. Человеческий фактор: история, теория и практика в авиации. М.: 2002. 280 с.
12. Леонова И.Ю., Леонов И.Н. Психометрическая проверка структуры методики «Шкала межличностного доверия» Дж. Роттера в адаптации С.Г. Достовалова и ее модификация // Вестник Удмуртского университета. Серия: Философия. Психология. Педагогика. 2016. Т. 26. Вып. 2. С. 93–111.
13. Ильин Е.П. Психология доверия. СПб.: Питер, 2013. 288 с.
14. Rotter J.B. (1971). Generalized Expectancies for Interpersonal Trust // American Psychologist. 1971. Vol. 26. Issue 12. Pp. 443–452. DOI:10.1037/H0031464
15. Скрипкина Т.П. Психология доверия. М.: Академия, 2000. 263 с.
16. Зинченко В.П. Психология доверия. Самара: Издательство СИОКПП, 2001. 104 с. URL: <http://>

psychlib.ru/mgppu/Zpd-001/Zpd-001.htm (дата обращения 13.08.2022).

17. Антоненко И.В. Доверие – тотальный феномен современного общества // Социальный психолог. 2005. № 2 (10). С. 93-99.

18. Купрейченко А.Б. Психология доверия и недоверия. М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2008. 564 с.

19. McAllister D.J. The second face of trust: Reflectionson the dark side of interpersonal trust in organizations / R.J. Lewicki, B.H. Sheppard M.H. Bazerman (Eds.), Research on negotiation in organizations. Greenwich, Connecticut: JAI Press. 1997. Vol. 6. Pp. 87-112.

20. Антоненко И.В. Социально-психологическая концепция доверия. М.: Флинта, Наука, 2006. 480 с.

21. Эриксон Э. Идентичность: юность и кризис / Пер. с англ.; общ. ред. и предисл. А.В. Толстых: 2-е изд. М.: Флинта: МПСИ: Прогресс, 2006. 352 с.

22. Маслоу А. Мотивация и личность. СПб.: Питер, 2011. 353 с.

23. Covey S., Merrill R. The Speed of Trust: The One Thing that Changes Everything. Free Press, 2006. 384 p.

24. Sztompka P. Trust: a sociological theory. Cambridge: Cambridge university press, 1999. 214 p.

25. Berne E. Classification of Positions // Transactional Analysis Bulletin. 1962. Vol. 62. No 3. P. 23.

26. Бабулина Л.В. Развитие жизненной позиции личности // Актуальные вопросы современной науки. 2011. № 18. С. 152-173. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-zhiznennoy-pozitsii-lichnosti> (дата обращения: 25.06.2022).

27. Леонтьев Д.А., Шильманская А.Е. Жизненная позиция личности: от теории к операционализации // Вопросы психологии. 2019. № 1. С. 90–100.

28. Макаров В.В., Макарова Г.А. Трансактный анализ – восточная версия. М.: Академический Проект, ОППЛ, 2002. 494 с.

29. Эйдельман Г.Н. Особенности жизненной позиции при различных уровнях психологического благополучия у современной молодежи // Экспериментальная психология. 2016. Т. 9. № 2. С. 82- 94. DOI:10.17759/exrpsy.2016090207

30. Радул В.В., Радул О.С. Социальная позиция личности // Universum: психология и образование: электрон. научн. журн. 2021. № 2 (80). URL: <https://7universum.com/ru/psy/archive/item/11219> (дата обращения 13.08.2022). DOI: 10.32743/UniPsy.2021.80.2.6-11

31. Скрипкина Т.П., Крищенко Е.П. Доверие как фактор развития субъектности в онтогенезе. Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2010. 328 с.

32. Фатхи О.Г. Доверие как фактор повышения адаптационных возможностей в экстремальных ситуациях: автореф. дис. ... канд. психол. наук. Ростов-на-Дону, 2003. 17 с.

33. Веселов Ю.В., Скворцов Н.Г. Доверие в эпоху цифровых трансформаций: опыт социологического исследования // Социологические исследования. 2021. № 6. С. 57–68. DOI 10.31857/S013216250012556-4

34. Гегедивш И.П. Межличностное и институциональное доверие // Молодой ученый. 2018. № 51 (237). С. 185–187. URL: <https://moluch.ru/archive/237/55090> (дата обращения: 11.06.2022).

35. Currall S.C., Judge T.A. Measuring trust between organizational boundary role persons // Organizational Behavior and Human Decision Processes. 1995. Vol 64. Pp. 151-170.

36. Kramer R.M. Trust and distrust in organization // Annual Review of Psychology. 1999. Vol. 50. Pp. 569–598.

37. Mazzella F., Sundarajan A., D’Espouse V., Möhlmann M. How Digital Trust Powers the Sharing Economy // IESE Insight. 2016. Third Quarter. P. 24–31. DOI: 10.15581/002.ART-2887

38. Аузан А.А. Миссия университета: взгляд экономиста // Вопросы образования. 2013. № 3. С. 266-286. DOI: 10.17323/1814-9545-2013-3-266-286.

39. Фукуяма Ф. Доверие: социальные добродетели и путь к процветанию. М.: АСТ, Ермак, 2004. 730 с.

40. Белянин А.В., Зинченко В.П. Доверие в экономике и общественной жизни. М.: Фонд «Либеральная миссия», 2010. 164 с.

41. Проблема ценностного статуса науки на рубеже XXI века / под ред. Л.Б. Баженова. СПб.: РХГИ, 1999. 280 с.

42. Фейерабенд П. Наука в свободном обществе / пер. с англ. М.: Аст: АСТ МОСКВА, 2010. 378 с.

43. Решетников М.М. Современная российская ментальность: 2-е изд. М.: Российские вести, 1996. 102 с.

44. Силуянова И.В., Яковлев В.В. Врач глазами пациента: результаты социологических опросов // Главврач. 2009. № 3. С. 87–93.

45. Пономаренко В.А. Смысл авиации 5-го поколения. М.: Когито-Центр, 2017. 276 с.

46. Международная организация гражданской авиации (ИКАО). Годовой доклад Совета за 2019 год [Электронный ресурс]. URL: https://www.icao.int/annual-report-2019/Pages/emerging-aviation-issues-cybersecurity_ru.aspx (дата обращения: 13.08.2022).

47. Пономаренко В.А. Психология человеческого фактора в опасной профессии. Красноярск: Поликом, 2006. 629 с.

48. Эриксон Э. Детство и общество / Изд. 2-е, перераб. и доп.; пер. с англ. СПб.: Ленато, АСТ, Фонд «Университетская книга», 1996. 592 с.

49. Покровский Б.Л. Эмоциональный стресс // Функциональное состояние летчика в экстремальных условиях / под ред. В.А. Пономаренко, П.В. Васильева. М.: Полет, 1994. С. 273–304.

References

1. Arinicheva O.V., Malishevsky A.V. A study of the socionic characteristics of males and females for improving the reliability of aptitude screening of aviation specialists. *Dependability* 2021;1: 45-54. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-1-45-54>.

2. Zolotykh V.I. On aviation system levels and structure of aviation unit flight safety system. [*Vozdushno-kosmicheskiiye sily. Teoria i praktika*] 2019;11:15-23. (in Russ.)
3. [Concept of flight safety of the Armed Forces of the Russian Federation]. Approved by the Ministry of Defense of the Russian Federation on 31.05.2017. Moscow: Aviation Flight Safety Service of the Armed Forces; 2017. (in Russ.)
4. Krasilnikov G.T., Krachko E.A., Malchinsky F.V. Developing a Diagnostic Tool for a Prognostic Assessment of Resistance to Professional Information Stress in Flight Personnel. *Russian Psychological Journal* 2021;18(1):47-60. doi: 10.21702/rpj.2021.1.4.
5. Krachko E.A., Krasilnikov G.T., Malchinsky F.V., Khvostova S.L. Reliability of forecast of successful flight training based on professional psychological selection. *Dependability* 2018;18(3):27-30. doi: 10.21683/1729-2646-2018-18-3
6. Lapa V.V., Ponomarenko V.A., Chuntul A.V. [Psychophysiology of flight safety]. Moscow; 2013. (in Russ.)
7. Plotnikov N.I. The bases of human – operator dependability theory. *Dependability* 2015;2:94-97. DOI:10.21683/1729-2640-2016-16-3-3-7.
8. Ponomarenko V.A. [Flight safety, the pain of aviation]. Moscow: Flinta; 2007. (in Russ.)
9. Blagin A.A. [Psychological analysis of erroneous actions by flight personnel]. *The Education and science journal* 2009;6:74-81. (in Russ.)
10. Ponomarenko V.A. [The psychology of the human factor in a hazardous occupation]. Krasnoyarsk: Polikom; 2006. (in Russ.)
11. Kozlov V.V. [The Human factor: history, theory and practice in aviation]. Moscow; 2002. (in Russ.)
12. Leonova I.Yu., Leonov I.N. Psychometric properties of J.Rotter's "interpersonal trust scale" adapted to Russian language by S.G. Dostovalov and its modification. *Bulletin of Udmurt University. Series Philosophy. Psychology. Pedagogy* 2016;26(2):93-111. (in Russ.)
13. Ilyin E.P. [Psychology of trust]. Saint-Petersburg: Piter; 2013. (in Russ.)
14. Rotter J.B. Generalized Expectancies for Interpersonal Trust. *American Psychologist* 1971;26:443-452. doi:10.1037/H0031464Corpus ID: 144694593.
15. Skripkina T.P. [Psychology of trust]. Moscow: Academia; 2000. (in Russ.)
16. Zinchenko V.P. [Psychology of trust]. Samara: Izdatelstvo SIOKPP; 2001. (in Russ.)
17. Antonenko I.V. [Trust, a total phenomenon of the modern society]. [*Sotsialny psikholog*] 2005;2(10). (in Russ.)
18. Kupreichenko A.B. [Psychology of trust and distrust]. Moscow: Izdatekstvo Instituta psikhologii RAN; 2008. (in Russ.)
19. McAllister D.J., Lewicki R.J., Sheppard B.H., Bazerman M.H., editors. The second face of trust: Reflections on the dark side of interpersonal trust in organizations. Research on negotiation in organizations, Vol. 6. Greenwich, Connecticut: JAI Press; 1997. P. 87-112.
20. Antonenko I.V. [The psychosocial concept of trust]. Moscow: Flinta, Nauka; 2006. (in Russ.)
21. Erikson E. Identity Youth and Crisis. Moscow: Flinta; MPSI: Progress; 2006. (in Russ.)
22. Maslow A. Motivation and Personality. Saint-Petersburg: Piter; 2011. (in Russ.)
23. Covey S., Merrill R. The Speed of Trust: The One Thing that Changes Everything. Free Press; 2006.
24. Sztompka P. Trust: a sociological theory. Cambridge: Cambridge University Press; 1999.
25. Berne E. Classification of Positions. *Transactional Analysis Bulletin* 1962;62(3):23.
26. Babulina L.V. [Development of a person's view of life]. [*Aktualnyye voprosy sovremennoy nauki*] 2011;18:152-173. (accessed 25.06.2022). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-zhiznennoy-pozitsii-lichnosti>. (in Russ.)
27. Leontiev D.A., Shilmanskaya A.E. [A person's view of life: from theory to operationalisation]. *Voprosy Psikhologii* 2019;1:90-100. (in Russ.)
28. Makarov V.V., Makarova G.A. [Transactional analysis, the Eastern version]. Moscow: Akademicheskii proekt, OPPL; 2002. (in Russ.)
29. Eidelman G.N. The features of beliefs at different levels of psychological well-being among today's youth. *Experimental Psychology* 2016;9(2):82-94. doi:10.17759/exppsy.2016090207. (in Russ.)
30. Radul V.V., Radul O.S. Personality social position. *Universum: psikhologia i obrazovaniye: elektron. nauchn. zhurn.* 2021;2(80). Available at: <https://universum.com/ru/psy/archive/item/11219>. DOI: 10.32743 /UniPsy.2021.80.2.6-11. (in Russ.)
31. Skripkina T.P., Krishchenko E.P. [Trust as a factor of agency development as part of ontogeny]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU; 2010. (in Russ.)
32. Fatkhi O.G. [Trust as a factor contributing to the growth of adaptive capability in extreme situations; Abstract, Candidate of Psychology thesis]. Rostov-on-Don; 2003. (in Russ.)
33. Veselov Yu.V., Skvortsov N.G. Trust in the Age of Digital Transformations: a Sociological Study. *Sociological Studies* 2021;6:57-68. DOI 10.31857/S013216250012556-4. (in Russ.)
34. Gegedivsh I.P. [Interpersonal and institutional trust]. *Moloday uchiony* 2018;51(237):185-187. (accessed 11.06.2022). Available at: <https://moluch.ru/archive/237/55090>. (in Russ.)
35. Currall S.C., Judge T.A. Measuring trust between organizational boundary role persons. *Organizational Behavior and Human Decision Processes* 1995;64:151-170.
36. Kramer R.M. Trust and distrust in organization. *Annual Review of Psychology* 1999;50:569-598.
37. Mazzella F., Sundarajan A., D'Espouse V., Möhlmann M. How Digital Trust Powers the Sharing Economy. *IESE Insight. Third Quarter* 2016:24-31. DOI: 10.15581/002.ART-2887.
38. Auzan A.A. [Mission of the university: an economist's view]. *Education Studies* 2013;3:266-286. doi.org/10.17323/1814-9545-2013-3-266-286. (in Russ.)

39. Fukuyama F. Trust: The Social Virtues and The Creation of Prosperity. Moscow: AST, Yermak; 2004. (in Russ.)

40. Belianin A.V., Zinchenko A.V. [Trust in economics and social life]. Moscow: Fond Liberalnaia missia; 2010. (in Russ.)

41. Bazhenov L.B., editor. [The problem of the value status of science at the doorstep of the XXI century]. Saint Petersburg: RHGI; 1999. (in Russ.)

42. Fejerabend P. Science in a Free Society. Moscow: AST Moskva; 2010.

43. Reshetnikov M.M. [Modern Russian mentality, 2-dn edition]. Moscow: Rossiyskiye vesti; 1996. (in Russ.)

44. Siluyanov I.V., Yakovlev V.V. [A doctor through a patient's eyes: poll results]. *Chief Medical Officer* 2009;3:87-93. (in Russ.)

45. Ponomarenko V.A. [The purpose of 5-th generation aircraft]. Moscow: Kogito-Tsentri; 2017. (in Russ.)

46. [ICAO. Annual report 2019. Emerging problems in aviation. Cyber security and trust mechanism].

47. Ponomarenko V.A. [The psychology of the human factor in a hazardous occupation]. Krasnoyarsk: Polikom; 2006. (in Russ.)

48. Erikson E. Childhood and Society. Second edition, revised and extended. Saint Petersburg: Lenato, AST, Fond Universitetskaya kniga; 1996.

49. Pokrovsky B.L. [Emotional stress]. In: [Functional state of a pilot in extreme situations]. Moscow: Poliot; 1994. (in Russ.)

Сведения об авторах

Красильников Геннадий Тимофеевич – доктор медицинских наук, профессор, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела (профессионального психологического отбора и профессионального психологического сопровождения обучения летного состава), Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова, Краснодар, Российская Федерация; e-mail: gennadykras@mail.ru

Крачко Эльвира Адисовна – кандидат медицинских наук, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории психофизиологических проблем профессиональной подготовки летного состава научно-исследовательского отдела, Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова, Краснодар, Российская Федерация, e-mail: elvira.krachko@yandex.ru

Мальчинский Федор Валентинович – кандидат психологических наук, начальник научно-исследова-

тельского отдела (профессионального психологического отбора и профессионального психологического сопровождения обучения летного состава), Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова, Краснодар, Российская Федерация, e-mail: nil.pfl@yandex.ru

About the authors

Gennady T. Krasilnikov, Doctor of Medicine, Professor, Senior Researcher, Scientific Research Department (Aptitude Screening and Professional Psychological Coaching of Flight Personnel), Hero of the Soviet Union A.K. Serov Krasnodar Higher Aviation School of Pilots, Krasnodar, Russian Federation; e-mail: gennadykras@mail.ru.

Elvira A. Krachko, Candidate of Medicine, Researcher of Research Laboratory of Psychophysiological Aspects of Professional Training of Flight Personnel, Scientific Research Department, Hero of the Soviet Union A.K. Serov Krasnodar Higher Aviation School of Pilots, Krasnodar, Federation Krasnodar, e-mail: elvira.krachko@yandex.ru.

Fedor V. Malchinsky, Candidate of Psychology, Head of Scientific Research Department (Aptitude Screening and Professional Psychological Coaching of Flight Personnel), Hero of the Soviet Union A.K. Serov Krasnodar Higher Aviation School of Pilots, Krasnodar, Russian Federation, e-mail: nil.pfl@yandex.ru.

Вклад авторов в статью

Красильников Г.Т. – составление дизайна исследования, осуществление подбора тематических литературных источников, обзор существующего состояния рассматриваемой проблемы с применением приемов теоретического анализа. Осуществлен анализ значения фактора доверия в сферах военной и гражданской авиации.

Крачко Э.А. – участие в составлении дизайна исследования, осуществление подбора тематических литературных источников, обзор существующего состояния рассматриваемой проблемы с применением приемов теоретического анализа.

Мальчинский Ф.В. – обзор существующего состояния рассматриваемой проблемы с применением приемов теоретического анализа. Осуществлен анализ значения фактора доверия в сферах военной и гражданской авиации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Оценка экономической эффективности профилактических мероприятий по сокращению числа нарушений при управлении подвижным составом

Evaluating the economic efficiency of preventive measures aimed at reducing the number of train control violations

Кулагин М.А.^{1, 2*}, Сидоренко В.Г.^{1, 2}
Kulagin M.A.^{1, 2*}, Sidorenko V.G.^{1, 2}

¹РУТ(МИИТ), Москва, Российская Федерация, ²Научно-технический университет «Сириус», Олимпийский пр., 1, 354340, Сочи, Россия

¹RUT(MIIT), Moscow, Russian Federation, ²Sirius University of Science and Technology, 1 Olympic Ave, 354340, Sochi, Russia

*maksimkulagin06@yandex.ru



Кулагин М.А.



Сидоренко В.Г.

Резюме. Цель. Целью работы является рассмотрение вопросов повышения объективности оценки качества управления подвижным составом машинистами. **Методы.** В исследовании, представленном в статье, используются методы статистического анализа и линейной алгебры. **Результаты.** Разработан алгоритм формирования профилактических мероприятий и произведена оценка эффективности их применения для машинистов транспортных средств городских рельсовых транспортных систем (ГРТС). Алгоритм формирования профилактических мероприятий для машинистов ГРТС включает в себя: прогнозирование нарушений; определение факторов, влияющих на возникновение каждого из типов нарушений; определение показателей машинистов, больше всего отклоняющихся от целевых значений. Оценка эффективности базируется на предположении о соотношении стоимости работы машиниста-инструктора с машинистом к стоимости потерь, которые может понести компания в случае совершения нарушения. В статье показано, что уровень ошибки первого рода в модели прогнозирования нарушений в работе машинистов оправдан при условии, что затраты, которые возникают при грубых нарушениях при управлении подвижным составом, значительно выше затрат на работу с этим машинистом. Представлен анализ применения интеллектуальной системы в 4-х эксплуатационных депо. **Заключение.** В статье представлен алгоритм формирования профилактических мероприятий для машинистов, управляющих подвижным составом. Сформулирован экономический критерий эффективности применения разработанной математической модели прогнозирования грубого нарушения при управлении подвижным составом машинистом. Проведен анализ необходимых и достаточных условий экономической эффективности применения интеллектуальной системы. Представлен сравнительный анализ среднего количества грубых нарушений при управлении подвижным составом машинистами в депо с внедренной интеллектуальной системой и без нее.

Abstract. Aim. The paper aims to examine the matters related to increasing the objectivity of evaluation of the quality of train control by train drivers. **Methods.** The study presented in the paper uses statistical analysis and linear algebra. **Results.** An algorithm was developed for defining preventive measures and their application efficiency was evaluated for drivers of rapid transit trains. The algorithm for defining preventive measures for drivers of rapid transit trains includes the following: violation prediction; definition of the factors that affect the onset of each type of violations; definition of the characteristics of the drivers that most deviate from the target values. The efficiency estimation is based on the assumption of correlation between the cost of a driving instructor's work with a driver and the cost of losses that the company might incur in case of violations. The paper shows that the level of an error of the first kind in the train driver violation prediction model is justified, provided that the cost incurred as the result of gross train control violations is significantly greater than that associated with the training of such driver. The paper presents an analysis of the application of the AI-based system in four depots. **Conclusion.** The paper presents an algorithm for defining preventive measures for train drivers. An economic criterion was defined for evaluating the efficiency of application of the developed mathematical model for predicting gross violations of train control. The required and sufficient conditions of economic efficiency of the AI-based systems application were analysed. A comparative analysis was presented of the mean number of gross train driving violations in depots with and without the AI-based system.

Ключевые слова: интеллектуальное управление, городской рельсовый транспорт, машинист, вероятность возникновения нарушений.

Keywords: smart control, urban rail transportation, driver, probability of violation.

Для цитирования: Кулагин М.А., Сидоренко В.Г. Оценка экономической эффективности профилактических мероприятий по сокращению числа нарушений при управлении подвижным составом // Надежность. 2022. №4. С. 37-44. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-4-37-44>

For citation: Kulagin M.A., Sidorenko V.G. Evaluating the economic efficiency of preventive measures aimed at reducing the number of train control violations. Dependability 2022;4:37-44. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-4-37-44>

Поступила 12.09.2022 / После доработки 21.10.2022 / К печати 15.12.2022

Received on: 12.09.2022 / Revised on: 21.10.2022 / For printing: 15.12.2022.

Введение

Одной из составляющих интеллектуальной системы управления производственными ресурсами городских рельсовых транспортных систем (ИСУ ПР ГРТС) является интеллектуальная система прогнозирования, планирования и анализа работы сотрудников ГРТС, функционирование которой направлено на комплексную автоматизацию процесса управления кадрами и их профессиональной подготовкой и решение применительно к разным категориям сотрудников родственных задач [1, 2]:

- обучение персонала;
- оценка качества подготовки персонала и его квалификации;
- оценка качества управления объектами ГРТС и выполнения работ;
- создание графика работы персонала.

Данная статья посвящена рассмотрению вопросов повышения объективности оценки качества управления подвижным составом машинистами. В настоящее время деятельность машинистов не имеет объективной и независимой от машиниста-инструктора системы оценки. Учет и определение значимости показателей, которые характеризуют качество работы машиниста, зависят в

основном только от закрепленного над ним руководителя, то есть наблюдается присутствие влияния «человеческого фактора». Для автоматизации этих процессов разработана и внедрена автоматизированная рекомендательная система «Доверенная среда локомотивного комплекса», которая позволяет дать объективную оценку анализа деятельности машиниста и сформировать список рекомендуемых профилактических мероприятий, направленных на снижение частоты возникновения нарушений при управлении подвижным составом, что в свою очередь способствует снижению рисков, связанных с такими нарушениями [3]. При создании «Доверенной среды локомотивного комплекса» нашли практическое применение принципы построения и математические модели интеллектуальной системы анализа и прогнозирования нарушений при управлении подвижным составом (ИСУПС_{маш}), разработанные авторами статьи [4, 5]. Формирование перечня профилактических мероприятий для машиниста базируется на результатах прогнозирования нарушения и его типа, а также расчета отклонения показателей машиниста от целевых [6]. При совершении прогноза у модели могут возникать ошибки первого и второго рода. Ошибки первого рода представляют собой события ложного определения машинистов, с которыми требуется проведение профилактических мероприятий, а это влечет за собой затраты компании ОАО «РЖД». Ошибки второго рода представляют собой события непроведения профилактических мероприятий с машинистами, с которыми это требуется, а это влечет за собой затраты компании ОАО «РЖД» на ликвидацию последствий нарушений. Поэтому целесообразно показать эффективность проведения основной и дополнительной профилактической работы, рекомендуемой ИСУПС_{маш}.



Рис. 1. Жизненный цикл локомотивной бригады

Обзор источников

В ОАО «РЖД» накоплен достаточный объем данных о работе машинистов, поэтому задачу про-

Табл. 1. Факторы, влияющие на возникновение нарушения

Номер	Группа факторов	Факторы
Ф1	Человеческий фактор	Низкий уровень знаний
Ф2	Человеческий фактор	Недостаток опыта
Ф3	Человеческий фактор	Невнимательность
Ф4	Человеческий фактор	Отвлечение
Ф5	Человеческий фактор	Спешка
Ф6	Человеческий фактор	Халатность
Ф7	Общая характеристика нарушения	Негрубое нарушение
Ф8	Общая характеристика нарушения	Грубое нарушение
Ф9	Общая характеристика нарушения	С нарушением регламента
Ф10	Общая характеристика нарушения	С возможностью нарушения безопасности
Ф11	Общая характеристика нарушения	Факт нарушения безопасности

гнозирования нарушения по вине машиниста также можно решать с использованием методов машинного обучения, в частности с использованием методов обучения с учителем. Кроме того, интеллектуальные подходы и подходы по оценке рисков сейчас активно используются в ОАО «РЖД» [7–12].

В начале статьи целесообразно представить краткую характеристику технологического жизненного цикла локомотивной бригады (ЛБ) и машиниста (рис. 1). Полный технологический жизненный цикл ЛБ состоит из двух частей: оборот ЛБ и домашний отдых. Технологический жизненный цикл ЛБ состоит из 2-х основных процессов. Первый процесс характеризуется отдыхом ЛБ в домашних условиях. Второй процесс относится к поездкам, когда ЛБ отдыхает в пункте оборота.

В основные обязанности ЛБ входит [13]:

- обеспечение безопасности движения поездов при выполнении эксплуатационной работы;
- соблюдение требований охраны труда, пожарной и экологической безопасности;

- знание и выполнение правил технической эксплуатации и других нормативных актов по вопросам, относящимся к обязанностям работников ЛБ;

- повышение своих квалификации, технических знаний и профессионального мастерства.

Методы и используемые данные

Исходя из разработанных подходов к прогнозированию нарушений и определению отклонений показателей машинистов от целевых значений, задачей данной статьи является создание и апробация алгоритма формирования мероприятий, оценка их эффективности с экономической точки зрения. В разработанных подходах к прогнозированию нарушений рассматриваются грубые нарушения при управлении подвижным составом. Под грубыми нарушениями понимаются нарушения, которые оказывают прямое влияние на безопасность движения поездов. Влияние нарушения на безопасность движения поездов оценено с использованием метода экспертных оценок по 10-балльной шкале, где 1 – менее всего влияет на безопасность и несет минимальные риски; 10 – более всего влияет на безопасность и несет за собой высокие риски возникновения транспортных происшествий. Нарушение с баллом ≥ 8 относится к грубым нарушениям.

Формирование рекомендаций и мероприятий для машиниста осуществляется на базе информации о нарушениях, прогнозируемых алгоритмом, представленным в [4–6]. Для каждого типа нарушений определены факторы, влияющие на его возникновение. Эти факторы можно разделить на две группы: общая характеристика и «человеческий фактор» (табл. 1).

Мероприятия, применяемые к машинисту, разделяются на два класса:

- «краткосрочные» (далее КР) – перед поездкой;
- «долгосрочные» (далее ДР) – после поездки.

Для решения поставленной задачи составлена сводная таблица связей между факторами, влияющими на возникновение нарушений, и мероприятиями, принимаемыми в случае их возникновения, и матрица соответствия мероприятий и факторов, влияющих на их возникновение (табл. 2, где обозначено: 0 – нет связи, 1 – есть связь).

Табл. 2 Матрица соответствия мероприятий и факторов, влияющих на возникновение нарушения

Мероприятие	Класс	Факторы										
		Ф1	Ф2	Ф3	Ф4	Ф5	Ф6	Ф7	Ф8	Ф9	Ф10	Ф11
Разъяснительная работа	КР	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1
Ужесточение дисциплинарных мер	ДР	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1
Теоретическое обучение	ДР	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1
Практическое обучение	ДР	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0	1
Определение качества отдыха	ДР	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1
Переформирование бригады	КР	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
Психофизиологическое наблюдение	ДР	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	1
Повышение квалификации	ДР	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
Дополнительный контроль на линии	КР	0	0	1	1	1	1	1	0	1	1	0

Результаты

Для выявления факторов, влияющих на возникновение нарушений, проведен статистический анализ влияния показателей работы машиниста на появление грубых нарушений. В качестве статистических критериев использовались: *t*-критерий Стьюдента и критерий Манна-Уитни [14].

Результаты анализа показали неравенство средних значений в выборках данных при наличии нарушений и их отсутствии при уровне значимости 0,05 для следующих показателей:

- время работы за неделю/месяц до нарушения;
- количество баллов за последнюю плановую проверку знаний;
- количество уникальных помощников за последние 7/30 дней.

Показано наличие сдвига между распределениями в выборках данных при наличии нарушений и их отсутствии при уровне значимости 0,05 для следующих показателей:

- количество симптомов дизадаптации/срывов адаптации;
- количество случаев расхода топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) по отношению к нормальному на 20% за 7/30 дней;

- средний балл по неплановым проверкам знаний за последние 30 дней;
- влияние количества грубых нарушений, совершенных за последние 7/30/90 дней;
- частота смены норм-участка за последние 30/90 дней.

Алгоритм формирования мероприятий состоит из следующих шагов:

1. Определяются все совершенные и прогнозируемые нарушения за последние *N* дней и формируется матрица $V \in R^{k \times f}$, где *k* – количество нарушений, *f* – количество факторов (табл. 1: Ф1-Ф11). Значения *f_j* могут принимать 0 или 1, в зависимости от соответствия факторов и совершенного нарушения (1 – связь фактора и нарушения есть, 0 – связь фактора и нарушения отсутствует).

2. Определяется матрица соответствия мероприятий и факторов $E \in R^{e \times f}$, где *e* – это количество мероприятий (табл. 2).

3. Производится перемножение матриц: $R = E \cdot V^T$.

4. Затем производится суммирование значений матрицы *R* по столбцам, результаты сортируются по убыванию и каждому мероприятию присваивается ранг.

Важность мероприятия определяется его рангом. Чем выше ранг, тем выше приоритет мероприятия для данного машиниста.

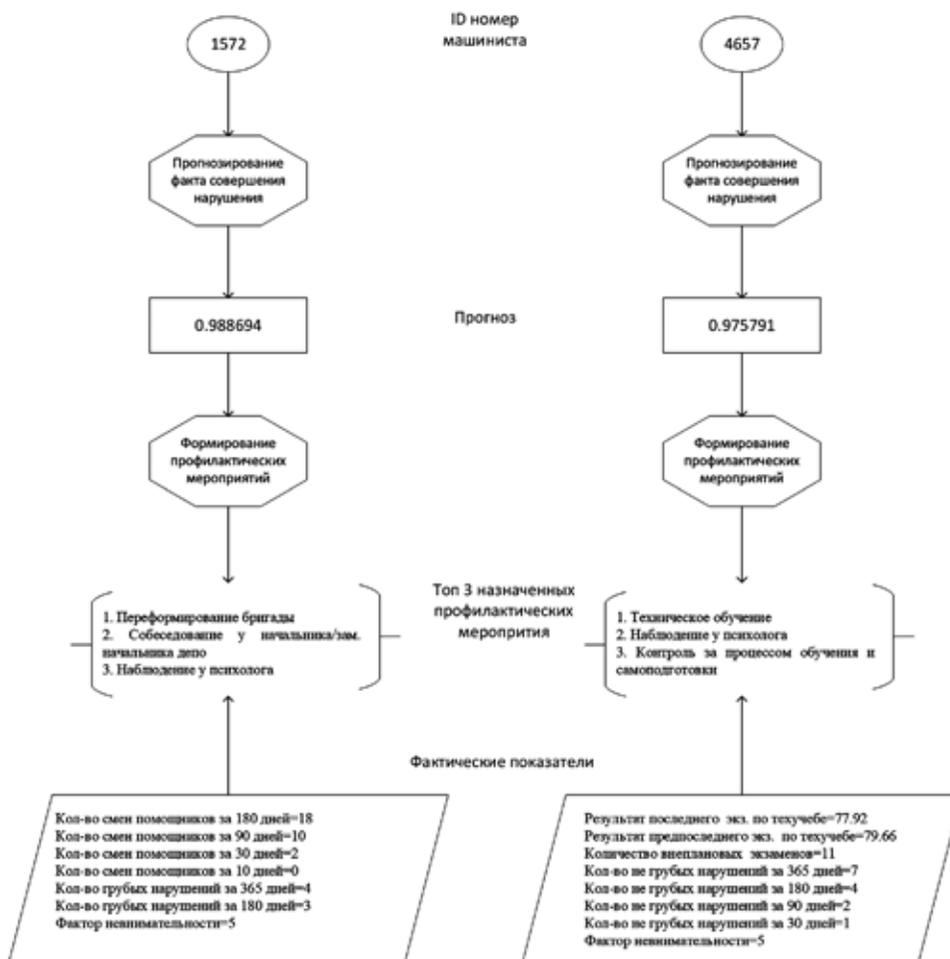


Рис. 2. Примеры назначения мероприятий для двух машинистов по результатам их работы

Для каждого машиниста можно определить набор из представленных факторов, в т. ч. которые наиболее сильно выделяются у данного машиниста.

Алгоритм формирования вектора факторов машиниста:

1. Для всех совершенных машинистом нарушений за последние N дней происходит суммирование набранных факторов из группы «Человеческие факторы», умноженных на веса.

2. Вектор факторов сортируются по убыванию и каждому фактору присваивается ранг.

3. Для каждого машиниста формируется вектор рангов факторов, характеризующий его слабые стороны.

На рис. 2 представлен пример мероприятий, рекомендуемых машинисту, на основе информации о совершенных и прогнозируемых нарушениях при управлении подвижным составом.

Алгоритм формирования мероприятий по нарушениям имеет ограничения в той части, что прогнозируемые нарушения не всегда имеют высокую вероятность и машинист по другим показателям не проявляет отклонений от нормы. Чтобы избежать назначения лишних мероприятий, дополнительно разработаны условия, которые позволяют сформировать точечные мероприятия в зависимости от рассчитанных факторов и исторических показателей машинистов в целях уменьшения вероятности совершения нарушения.

Методика оценки эффективности профилактических мероприятий по сокращению числа нарушений при управлении подвижным составом

Для оценки экономического эффекта от внедрения разработанной математической модели прогнозирования нарушения при управлении подвижным составом машинистом сформулируем экономический критерий эффективности, используя понятие математического ожидания потерь при проведении с машинистом рекомендуемых ИСУПС_{маш} профилактических мероприятий E_m и математического ожидания потерь при отсутствии (без проведения с машинистом) рекомендуемых ИСУПС_{маш} профилактических мероприятий $E_{бм}$. Потери $E_{бм}$ можно определить следующим образом:

$$E_{бм} = p_1(C_n + C_o) + p_2C_o, \quad (1)$$

где p_1 – вероятность совершения нарушения без проведения рекомендуемых профилактических мероприятий, $p_1 = p$;

p_2 – вероятность отсутствия совершения нарушения без проведения рекомендуемых профилактических мероприятий, $p_1 + p_2 = 1$, $p_2 = 1 - p$.

C_n – затраты на ликвидацию последствий нарушения;

C_o – затраты на обязательные нужды.

В свою очередь выражение для затрат E_m на проведение мероприятий можно записать в следующем виде:

$$E_m = E_{11} + E_{12} + E_{21} + E_{22}. \quad (2)$$

Вывод значения каждого слагаемого потерь осуществляется исходя из следующих условий:

– рекомендуемые профилактические мероприятия проведены, но нарушение при управлении подвижным составом выявлено – $E_{11} = q_1 h_1 (C_n + C_m + C_o)$, где q_1 – вероятность того, что рекомендуемые профилактических мероприятия проведены качественно; h_1 – вероятность совершения нарушения при проведении рекомендуемых профилактических мероприятий (ошибка 1-го рода); C_m – затраты на проведение мероприятий;

– рекомендуемые профилактические мероприятия проведены и нарушения при управлении подвижным составом не произошло – $E_{12} = q_1 h_2 (C_m + C_o)$, где h_2 – вероятность отсутствия нарушения при проведении рекомендуемых профилактических мероприятий, $h_1 + h_2 = 1$;

– рекомендуемые профилактические мероприятия проведены некачественно (формально были назначены, но не были проведены машинистом-инструктором) и было нарушение при управлении подвижным составом – $E_{21} = q_2 p_1 (C_n + C_m + C_o)$, где q_2 – вероятность некачественного проведения рекомендуемых профилактических мероприятий, $q_2 = q$, $q_1 + q_2 = 1$, $q_1 = 1 - q$;

– рекомендуемые профилактические мероприятия проведены некачественно и не было нарушения при управлении подвижным составом (ошибка 2-го рода) – $E_{22} = q_2 p_2 (C_m + C_o)$.

Критерий экономической эффективности применения разработанной модели прогнозирования нарушений, совершаемых машинистом при управлении подвижным составом, можно представить в виде:

$$E_{бм} > E_m. \quad (3)$$

Одним из показателей эффективности применения модели является то, что $h_1 \ll p_1$, $h_2 \gg p_2$, в предельном случае, для которого проводятся дальнейшие математические преобразования, значение h_1 должно стремиться к 0, а h_2 – к 1;

Исходя из сформулированного критерия и принятых во внимание допущений, подставив значения в формулу (3), получаем:

$$C_n p + C_o > (1 - q)(C_m + C_o) + qp(C_n + C_m + C_o) + q(1 - p)(C_m + C_o), \quad (4)$$

$$C_n p + C_o > C_m + C_o + qpC_n, \quad (5)$$

$$p > \frac{C_m}{C_n(1 - q)}. \quad (6)$$

Если $k_c = \frac{C_m}{C_n}$ определить как коэффициент затрат, то можно получить (рис. 3):

$$p > \frac{k_c}{(1 - q)}. \quad (7)$$

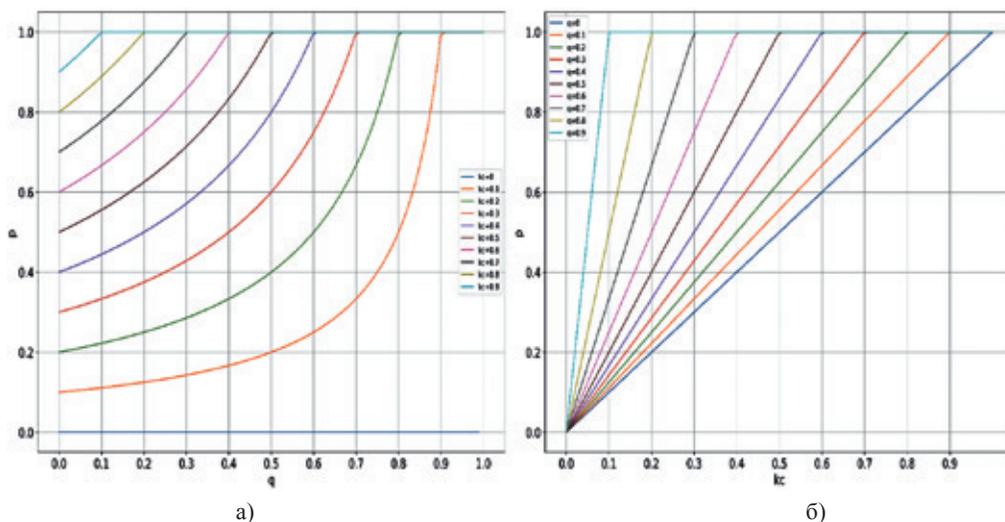


Рис. 3. Зависимости в соответствии с формулой (7): а) p от q ; б) p от k_c

Для расчета значений критерия для i -й поездки j -го машиниста зададим:

$$D_{ji} = \begin{cases} 0, p_{ji} \leq \frac{k_c}{1-q}; \\ 1, p_{ji} > \frac{k_c}{1-q}, \end{cases} \quad (8)$$

где D_{ji} – прогноз совершения нарушения при управлении подвижным составом при условии выполнения критерия для i -й поездки j -го машиниста.

$$R_{ji} = \begin{cases} 0, \text{нарушения не было;} \\ 1, \text{нарушение было,} \end{cases} \quad (9)$$

где R_{ji} – факт совершения нарушения при управлении подвижным составом для i -й поездки j -го машиниста. В результате можно рассчитать размер сокращения потерь с использованием модели (P_j) и без нее (F_j) для j -го машиниста:

$$F_j = \sum_{i=1}^{N_1} R_{ji}^{[1]} C_{ni} \quad (10)$$

$$P_j = \sum_{i=1}^{N_2} [D_{ji} C_{mi} + R_{ji}^{[2]} C_{ni}]. \quad (11)$$

Расчет по формуле (10) проводится для ситуации, когда мероприятия и не планировались ($R_{ji}^{[1]}$), а по формуле (11) – при наличии плановых мероприятий ($R_{ji}^{[2]}$), то есть рассматриваются разные множества поездок одной мощности ($N_1=N_2$). Разработанная математическая модель прогнозирования нарушений при управлении подвижным составом будет способствовать сокращению размера убытков компании в том случае, если критерий эффективности применения модели $M_j=F_j-P_j>0$. Если подставить значения P_j и F_j , то получим:

$$\begin{aligned} M_j &= \sum_{i=1}^{N_1} R_{ji}^{[1]} C_{ni} - \sum_{i=1}^{N_2} [D_{ji} C_{mi} + R_{ji}^{[2]} C_{ni}] = \\ &= \left[\sum_{i=1}^{N_1} R_{ji}^{[1]} C_{ni} - \sum_{i=1}^{N_2} R_{ji}^{[2]} C_{ni} \right] - \sum_{i=1}^{N_2} D_{ji} C_{mi}. \end{aligned} \quad (12)$$

Для вычисления общих потерь необходимо суммировать потери для всех машинистов:

$$M = \sum_{j=1}^L M_j.$$

Условия применимости разработанной методики

Ограничения использования разработанной методики оценки экономической эффективности применения ИСУПС_{маш} является оценка объективной стоимости каждого нарушения C_{ni} и мероприятия C_{mi} . Для выполнения критерия $M_j>0$ и доказательства экономической эффективности применения ИСУПС_{маш} необходимо уменьшение количества грубых нарушений безопасности.

Результаты внедрения системы проанализированы путем сравнения данных 4-х депо, в которых системы была внедрена, в сравнении с депо, где система не использовалась. В качестве статистики использовалось среднее количество грубых нарушений, которые были зафиксированы машинистами за 1 квартал 2022 года (рис. 4). Наблюдается сокращение количества грубых нарушений. Сокращение грубых нарушений является необходимым, но не достаточным условием того, чтобы критерий $M_j>0$ выполнялся. Достаточное условие будет только в том случае, если затраты на профилактические мероприятия, назначаемые ИСУПС_{маш}, будут значительно ниже затрат, которые появились бы из-за нарушений машинистами при управлении подвижным составом, которые не произошли после проведения профилактических мероприятий. Для достаточности условия требуется проведение дополнительных исследований стоимости профилактических мероприятий и нарушений при управлении подвижным составом.

Заключение

Основные результаты статьи:

– представлен алгоритм формирования профилактических мероприятий для машинистов, управляющих поездам в компании ОАО «РЖД»;



Рис. 4. Оценка среднего количества грубых нарушений при управлении подвижным составом, совершаемых машинистами в депо с использованием и без использования ИСУПС_{маш}

– сформулирован экономический критерий эффективности применения разработанной математической модели прогнозирования грубого нарушения при управлении подвижным составом машинистом;

– проведен анализ необходимых и достаточных условий выполнения критерия экономической эффективности применения ИСУПС_{маш};

– представлен сравнительный анализ среднего количества грубых нарушений при управлении подвижным составом машинистами в депо с внедренной системой ИСУПС_{маш} и без нее.

В качестве перспектив развития представленного исследования планируется:

– повышение качества работы моделей, в частности, путем поиска новых значимых показателей, внедрения новых алгоритмов обработки данных и применения математического аппарата управления функциональной надежностью;

– повышение уровня автоматизации процесса расшифровки скоростемерных лент и учета данных с регистраторов переговоров машиниста и помощника машиниста, машиниста и диспетчера.

Благодарности. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, НТУ «Сириус», ОАО «РЖД» и Образовательного Фонда «Талант и успех» в рамках научного проекта № 20-37-51001.

Библиографический список

1. Баранов Л.А., Сидоренко В.Г. Интеллектуальные киберфизические системы управления движением внеуличного транспорта (2 часть) // Транспортное строительство. 2021. № 4. С. 19-23.

2. Интеллектуальное централизованное управление движением внеуличного городского железнодорожного транспорта в условиях интенсивного движения / Л.А. Баранов, В.Г. Сидоренко, Е.П. Балакина, Л.Н. Логинова // Надежность. 2021. Т. 21. № 2. С. 17-23. DOI: 10.21683/1729-2646-2021-21-2-17-23

3. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2020612670 Россия. Автоматизированная система Доверенная среда локомотивного

комплекса (2019) / Кулагин М. А., Харин О. В., Якимов С. М., Гоник М. М., Хлудеев М. А., Ярошук Д. И.; опубл. 23.03.2020.

4. Kulagin M., Sidorenko V. A Recommender Subsystem Construction for Calculating the Probability of a Violation by a Locomotive Driver using Machine-learning Algorithms // 2020 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). 2020. Pp. 1-5.

5. Kulagin M., Sidorenko V. An Intelligent Evaluation System for Predicting Engine Driver Reliability // Russian Electrical Engineering. 2020. Vol. 91. № 9. Pp. 587-591.

6. Кулагин М.А., Сидоренко В.Г. Поддержка принятия решения по профилактике нарушений безопасности в работе // Надежность. 2021. Т. 21 № 4. С. 38-46.

7. Проневич О.Б., Зайцев М.В. Интеллектуальные методы повышения точности прогнозирования редких опасных событий на железнодорожном транспорте // Надежность. 2021. Т. 21. № 3. С. 54-64.

8. Применение методов машинного обучения для прогнозирования опасных отказов объектов железнодорожного пути / И.Б. Шубинский, А.М. Замышляев, О.Б. Проневич, А.Н. Игнатов, Е.Н. Платонов // Надежность. 2020. Т. 20. № 2. С. 43-53.

9. Гапанович В.А., Шубинский И.Б., Замышляев А.М. Математическое и информационное обеспечение системы УРРАН // Надежность. 2013. № 1. С. 3-19.

10. Гречишников В.А., Куров Н.Д., Куров Д.А. Использование квалификационной способности нейронных сетей для определения аварийных режимов в тяговой сети // Электротехника. 2020. № 9. С. 20-25.

11. Kulagin M., Khromov S., Sidorenko V. Machine learning application for support for automated control systems users // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1680. № 1. P. 12019.

12. Воронкова Е.А., Медведева В.М. Оценка профессиональных рисков машинистов и помощников машинистов железнодорожно-строительных машин // Проблемы безопасности российского общества. 2019. № 4. С. 42-48.

13. Петренко В. Современные тренажеры для локомотивных бригад // Проблемы безопасности на транспорте:

материалы X международной научно-практической конференции. Часть 3: Безопасность транспортных систем. Безопасность пассажирских перевозок. Гомель, 26–27 ноября 2020 г. С. 48-49.

14. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning. New York: Springer, 2001. 745 p.

References

1. Baranov L.A., Sidorenko V.G. [Smart cyberphysical rapid transit control systems (Part 2)]. *Transportnoye stroitelstvo* 2021;4:19-23. (in Russ.)

2. Baranov L.A., Sidorenko V.G., Balakina E.P., Loginova L. N. Intelligent centralized traffic management of a rapid transit system under heavy traffic. *Dependability* 2021;21(2):17-23. DOI 10.21683/1729-2646-2021-21-2-17-23.

3. Kulagin M.A., Kharin O.V., Yakimov S.M., Gonik M.M., Khludeev M.A., Yaroshchuk D.I. [Automated System Trusted Environment of the Locomotive Service. Russian state registration certificate for software no. 2020612670]. Published on 23.03.2020.

4. Kulagin M., Sidorenko V. Recommender Subsystem Construction for Calculating the Probability of a Violation by a Locomotive Driver using Machine-learning Algorithms. IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS); 2020. P. 1-5.

5. Kulagin M., Sidorenko V. An Intelligent Evaluation System for Predicting Engine Driver Reliability. *Russian Electrical Engineering* 2020;91(9):587-591.

6. Kulagin M.A., Sidorenko V.G. Decision support for preventing safety violations. *Dependability* 2021;21(4):38-46.

7. Pronevich O.B., Zaytsev M.V. Intelligent methods for improving the accuracy of prediction of rare hazardous events in railway transportation. *Dependability* 2021;3: 54-64.

8. Shubinsky I.B., Zamyshliaev A.M., Pronevich O.B., Platonov E.N., Ignatov A.N. Application of machine learning methods for predicting hazardous failures of railway track assets. *Dependability* 2020;2:45-53.

9. Gapanovich V.A., Shubinsky I.B., Zamyshlyayev A.M. Mathematical and information support of the URRAN system. *Dependability* 2012;3:12-19.

10. Grechishnikov V.A., Kurov N.D., Kurov D.A. Using the qualification ability of neural networks for identifying emergency modes in an electric traction network. *Elektrotehnika* 2020;9:20-25. (in Russ.)

11. Kulagin M., Khromov S., Sidorenko V. Machine learning application for support for automated control systems users. *Journal of Physics: Conference Series* 2020;1680(1):12019.

12. Voronkova E.A., Medvedeva V.M. Assessment of the professional risks of machinists and assistants of railway

and construction machine operators. *Security problems of the Russian society* 2019;4:42-48. (in Russ.)

13. Petrenko V. [Advanced train crew simulators]. In: [Proceedings of the X International Research and Practice Conference Matters of Transportation Safety. Part 3: Transportation System Safety. Passenger Transportation Safety]; 2020. P. 48-49. (in Russ.)

14. Hastie T., Tibshirani R., Friedman J. The Elements of Statistical Learning. New York: Springer; 2001.

Сведения об авторах

Кулагин Максим Алексеевич – заместитель начальника отдела разработки технологических информационных систем АО «ВНИИЖТ», ул. 3-я Мытищинская, д. 10, Москва, Российская Федерация, 129626; доцент кафедры «Управление и защита информации» РУТ (МИИТ), ул. Образцова, д.9, стр.9, Москва, Российская Федерация, 127994, e-mail: maksimkulagin06@yandex.ru

Сидоренко Валентина Геннадьевна – доктор технических наук; профессор; профессор кафедры «Управление и защита информации» РУТ (МИИТ), ул. Образцова, д.9, стр.9, Москва, Российская Федерация, 127994, e-mail: valenfalk@mail.ru

About the authors

Maxim A. Kulagin, Deputy Head of Process-Oriented Information Systems Unit, JSC VNIIZhT, 10, 3-rd Mytishchinskaya St., Moscow, 129626, Russian Federation; Senior Lecturer, Department of Management and Protection of Information, RUT (MIIT), 9, bldg 9 Obrazcova St., Moscow, 127994, Russian Federation e-mail: maksimkulagin06@yandex.ru.

Valentina G. Sidorenko, Doctor of Engineering, Professor, Chair Professor, Department of Management and Protection of Information, RUT (MIIT), 9b9 Obrazcova St., Moscow, 127994, Russian Federation, e-mail: valenfalk@mail.ru.

Вклад авторов в статью

Кулагиным М.А. разработаны алгоритмы формирования перечня профилактических мероприятий, рекомендуемых для повышения надежности машиниста, и методика оценки эффективности профилактических мероприятий сокращению числа нарушений при управлении подвижным составом.

Сидоренко В.Г. проанализированы результаты применения и определены условия применимости методики оценки эффективности профилактических мероприятий по сокращению числа нарушений при управлении подвижным составом.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Особенности оценки показателей функциональной безопасности систем противоаварийной автоматической защиты с использованием деревьев неисправностей

Specificity of fault tree-based functional safety indicator definition in emergency shutdown systems

Можаяева И.А.^{1*}, Струков А.В.¹
Mozhaeva I.A.^{1*}, Strukov A.V.¹

¹Общество с ограниченной ответственностью «Специализированная инжиниринговая компания Севзапмонтажавтоматика» (ООО «СПИК СЗМА»)

¹SPIK SZMA

*irina_mozhaeva@szma.com



Можаяева И.А.



Струков А.В.

Резюме. Цель. Целью статьи является анализ особенностей использования коммерческих программных пакетов, основанных на моделях деревьев неисправностей (ДН), которые применяются в инженерной практике для расчета надежности систем противоаварийной автоматической защиты (ПАЗ). Стандарты серии МЭК 61508 «Функциональная безопасность» обращают внимание на возможность получения в таких случаях неверных и неконсервативных оценок средней вероятности отказа на запрос выполнения функций безопасности ПАЗ. Основным источником некорректных результатов является применение приближенных и упрощенных формул для определения показателей надежности компонентов контуров ПАЗ, и вычисление показателя средней неготовности системы ПАЗ к выполнению функций безопасности по значениям средней неготовности ее компонентов. Для коррекции результатов моделирования ДН возможно использование поправочных коэффициентов, учитывающих структуру контура ПАЗ, а также применение точных формул стандарта МЭК 61508-6 для расчета средней вероятности отказа на запрос компонентов контура ПАЗ. Кроме того, возможен выбор типа модели отказов по общим причинам (ООП). **Методы.** Проведен сравнительный анализ влияния составляющих опасных отказов, обнаруживаемых и не обнаруживаемых внутренним диагностированием, на оценку средней вероятности отказа на запрос компонентов контура ПАЗ. Показано, что для менее надежных компонентов эта зависимость существенно влияет на занижение оценки показателя неготовности. Эффективность введения корректирующих коэффициентов, учитывающих архитектуру контура ПАЗ, также зависит от надежности компонентов, и их введение целесообразно для тех компонентов, чей уровень полноты безопасности соответствует диапазону между уровнями 1 и 2. Для проектной оценки показателей функциональной безопасности возможно применение модели бета-фактора отказов по общим причинам, применяемой при проектном расчете функциональной безопасности ПАЗ. **Результаты.** Анализ упрощенных и приближенных формул для расчета средней неготовности нерезервированных элементов контура ПАЗ показал, что при диагностическом покрытии более 90% использование упрощенных формул приводит к занижению показателя неготовности за счет увеличения влияния опасных обнаруженных отказов на вероятность несрабатывания ПАЗ. При использовании метода анализа ДН для получения консервативной оценки показателя неготовности контура ПАЗ следует использовать корректирующие коэффициенты, значения которых зависят от параметров резервирования каналов ПАЗ. Рассмотрены две модели учета ООП, применяемые при расчетах функциональной безопасности ПАЗ. Показано, что при использовании любой модели ООП показатели надежности системы снижаются. Это снижение определяется величиной бета-фактора и надежностью элементов системы ПАЗ. **Заключение.** Изложенные в статье материалы показывают ограничения применения упрощенной формулы для оценки средней неготовности нерезервированных элементов ПАЗ в качестве исходных данных для построения ДН. При определении уровня полноты безопасности контура ПАЗ, имеющего в своем составе элементы с низкой надежностью, следует учитывать, что при использовании метода ДН в коммерческих программных пакетах возможно получение завышенных показателей надежности, что нежелательно в задачах анализа функциональной безопасности.

Abstract. Aim. The paper aims to analyse the specifics of the use of commercial fault tree (FT)-based software suites as part of engineering practice for the purpose of dependability calculation of emergency shutdown systems (ESS). Standards of the IEC 61508 Functional safety series stress that, in such cases, there is a possibility of incorrect and non-conservative

estimates of the mean probability of failure on demand of an ESS safety feature. Incorrect results are primarily caused by the use of approximate and simplified formulas for identifying the dependability indicators of ESS circuit components and calculating the ESS mean unavailability for safety function performance based on the mean unavailability values of its components. In order to correct the FT simulation results, correction factors can be used that take into account the ESS circuit structure along with exact formulas per IEC 61508-6 for calculating the mean probability of failure on demand of the ESS circuit components. Additionally, the type of common cause failure (CCF) model can be chosen. **Methods.** A comparative analysis was performed as regards the effects of components of hazardous failures that may be detected or not detected by internal diagnostics on the assessment of the mean probability of failure on demand of an ESS circuit components. It was shown that in less dependable components this dependence significantly affects the unavailability value. The efficiency of correction coefficients that take into account the ESS circuit architecture also depends on the dependability of components, and their introduction is justified for those components whose safety integrity level is between 1 and 2. Engineering estimation of the functional safety indicators can be done using a beta-factor model of common cause failures that is employed as part of design analysis of ESS functional safety. **Results.** An analysis of simplified and approximate formulas for calculating the mean unavailability of the non-redundant elements of an ESS circuit has shown that in the case of an over 90-percent diagnostic coverage the use of simplified formulas causes an underestimation of the unavailability indicator caused by the increased effect of detected hazardous failures on the probability of ESS misoperation. If the FT analysis is used for the purpose of deducing a conservative estimate of an ESS circuit unavailability indicator, correction factors should be used, whose values depend on the ESS channels redundancy parameters. Two models of accounting for CCF were examined that are used when calculating ESS functional safety. It was shown that under any ESS model the system's dependability indicators decrease. This decrease is defined by the value of the beta factor and the dependability of the ESS system elements. **Conclusion.** The information presented in the paper indicates the limited applicability of the simplified formula for calculating the mean unavailability of non-redundant ESS elements as the input data for FT construction. When identifying the safety integrity level of an ESS circuit that includes elements with a low dependability, it should be taken into consideration that, if a FT is used, commercial software suites may overestimate the dependability, which is undesirable in respect to functional safety analysis.

Ключевые слова: надежность, функциональная безопасность, система противоаварийной автоматической защиты, отказы по общим причинам, дерево неисправностей.

Keywords: dependability, functional safety, emergency shutdown system, common cause failures, fault tree

Для цитирования: Можяева И.А., Струков А.В. Особенности оценки показателей функциональной безопасности систем противоаварийной автоматической защиты с использованием деревьев неисправностей // Надежность. 2022. №4. С. 45-52. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-4-45-52>

For citation: Mozhaeva I.A., Strukov A.V. Specificity of fault tree-based functional safety indicator definition of emergency shutdown systems. *Dependability* 2022;4:45-52. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-4-45-52>

Поступила 19.08.2022 / **После доработки** 21.10.2022 / **К печати** 15.12.2022

Received on: 19.08.2022 / **Revised on:** 21.10.2022 / **For printing:** 15.12.2022.

Введение

Показатели функциональной безопасности систем противоаварийной автоматической защиты (ПАЗ) являются показателями надежности восстанавливаемых систем, работающих в режиме запроса. Так, например, основной показатель функциональной безопасности, определяющий уровень полноты безопасности контуров ПАЗ, – средняя вероятность отказа на запрос PFD_{avg} – есть средняя неготовность ПАЗ на интервале между контрольными проверками. Использование приближенных или упрощенных формул для расчета показателя PFD_{avg} может привести к ошибочным выводам.

В приложении В стандарта МЭК 61508-6-2012 [1] отмечаются две причины, которые могут привести к неверным, неконсервативным оценкам надежности систем ПАЗ, которые нежелательны при обеспечении безопасности промышленных процессов. Первая причина связана с использованием упрощенных формул оценки средней неготовности PFD_{avg} i – средней вероятности отказа на запрос i -го компонента системы ПАЗ. Вторая причина связана с тем, что для избыточных структур невозможно получить оценку средней неготовности системы ПАЗ только путем объединения обычным способом значений PFD_{avg} i ее компонентов. С математической точки зрения это объясняется

тем, что произведение средних не всегда есть среднее произведений.

В этой связи важным является понимание инженерами, проводящими расчет надежности систем ПАЗ с использованием коммерческих программных пакетов, основанных на использовании моделей дерева неисправностей (ДН), причин и размера ошибок, допускаемых при расчетах.

Упрощенные и приближенные формулы для нерезервированных элементов

Упрощенные формулы для расчета PFD_{avg} были введены в работе М. Rausand [2]. Формулы просты в использовании и дают адекватные результаты для многих архитектур каналов систем ПАЗ при определенных исходных данных о надежности компонентов и условиях эксплуатации.

Для архитектуры 1oo1, в которой любой опасный отказ приводит к отказу функции безопасности при обращении к ней, упрощенная формула для расчета показателя PFD_{avg} имеет вид

$$PFD_{avg} \cong \frac{1}{2} \lambda_{du} TI, \quad (1)$$

где $\lambda_{du} = \lambda_D (1 - \frac{DC}{100})$ – интенсивность опасных (*dangerous*) необнаруженных (*undetected*) отказов;

λ_D – интенсивность опасных отказов;

TI – интервал между контрольными проверками (*proof Test Interval*);

DC – диагностическое покрытие (достоверность диагностирования опасных отказов).

В упрощенной формуле учитываются только опасные необнаруженные отказы (DU). Также в упрощенных формулах среднее время восстановления ($MTTR$) и среднее время ремонта (MRT) считаются пренебрежительно малыми по сравнению с межконтрольным интервалом TI . Анализ влияния опасных обнаруженных отказов и ненулевого времени восстановления или ремонта можно показать на примерах расчета PFD_{avg} для архитектуры 1oo1 для крайних значений интенсивности опасных отказов $\lambda_D 2,5 \cdot 10^{-5}$ 1/ч и $5 \cdot 10^{-8}$ 1/ч, диагностического покры-

тия DC и межконтрольных интервалов TI , приведенных в таблицах приложения В стандарта МЭК 61508-6 [1].

В [1] приводятся приближенные формулы для расчета средней вероятности отказов на запрос, полученные на основе марковских моделей и пригодные для инженерного использования [3, 7]. Согласно стандарту [1] значение PFD_{avg} для архитектуры 1oo1 рассчитывается по формуле

$$PFD_{avg 1oo1} = \frac{1}{2} \lambda_{du} (TI + MTTR) + \lambda_{dd} MRT, \quad (2)$$

где $\lambda_{dd} = \lambda_D \frac{DC}{100}$ – интенсивность опасных (*dangerous*) обнаруженных (*detected*) отказов.

В табл. 1 показано влияние доли опасных обнаруженных и необнаруженных отказов при диагностическом покрытии 99% и 90% на показатель PFD_{avg} для архитектуры 1oo1 при различных значениях интервала между контрольными проверками TI .

Значения среднего времени восстановления и среднего времени ремонта выбраны, как и в МЭК 61508-6, равными $MTTR = MRT = 8$ час.

Как видно из табл. 1, заметное влияние опасных обнаруженных отказов имеет место только при значениях диагностического покрытия $DC > 90\%$.

Повышение доли опасных обнаруженных отказов в общем потоке опасных отказов, что определяется значением показателя DC , приводит к получению заниженных оценок по формуле (1). Так, при $TI = 4380$ ч., $\lambda_D = 5 \cdot 10^{-8}$ (1/ч) и $DC = 99\%$

по формуле (1):

$$\begin{aligned} PFD_{avg 1oo1} &= \frac{1}{2} \lambda_{du} TI = \\ &= \frac{1}{2} \cdot 5,00 \cdot 10^{-10} \cdot 4380 = 1,095 \cdot 10^{-6}, \end{aligned}$$

по формуле (2):

$$\begin{aligned} PFD_{avg 1oo1} &= \frac{1}{2} \lambda_{du} (TI + MTTR) + \lambda_{dd} MRT = \\ &= \frac{1}{2} 5,00 \cdot 10^{-10} \cdot (4380 + 8) + \\ &+ 4,95 \cdot 10^{-8} \cdot 8 = 1,493 \cdot 10^{-6}. \end{aligned}$$

Таблица 1 – Влияние опасных обнаруженных и необнаруженных отказов на показатель PFD_{avg} для архитектуры 1oo1

DC	$TI = 6$ месяцев	$TI = 120$ месяцев
99%	$\lambda_D = 2,5 \cdot 10^{-5}, \lambda_{DU} = 2,5 \cdot 10^{-7}, \lambda_{DD} = 2,475 \cdot 10^{-5}$	$\lambda_D = 5 \cdot 10^{-8}, \lambda_{DU} = 5 \cdot 10^{-10}, \lambda_{DD} = 4,95 \cdot 10^{-5}$
	$PFD_{avg} = \frac{1}{2} \lambda_{du} (TI + MTTR) + \lambda_{dd} MRT$ 73,476% 26,524%	$PFD_{avg} = \frac{1}{2} \lambda_{du} (TI + MTTR) + \lambda_{dd} MRT$ 98,2% 1,8%
90%	$\lambda_D = 2,5 \cdot 10^{-5}, \lambda_{DU} = 2,5 \cdot 10^{-6}, \lambda_{DD} = 2,25 \cdot 10^{-5}$	$\lambda_D = 5 \cdot 10^{-8}, \lambda_{DU} = 5 \cdot 10^{-9}, \lambda_{DD} = 4,5 \cdot 10^{-8}$
	$PFD_{avg} = \frac{1}{2} \lambda_{du} (TI + MTTR) + \lambda_{dd} MRT$ 96,8% 3,2%	$PFD_{avg} = \frac{1}{2} \lambda_{du} (TI + MTTR) + \lambda_{dd} MRT$ 99,8% 0,2%

Таким образом, занижение оценки PFD_{avg} по формуле (1) по сравнению с оценкой по формуле (2) равно $3,98 \cdot 10^{-7}$, что составляет 26,7% от значения $1,49 \cdot 10^{-6}$. Можно показать, что при уменьшении показателя DC занижение оценки PFD_{avg} становится незначительным. Так, выполнив расчет для полугодового интервала между контрольными проверками при $DC = 90\%$, получим значение PFD_{avg} по формуле (1), равное $1,095 \cdot 10^{-5}$, значение PFD_{avg} по формуле (2), равное $1,133 \cdot 10^{-5}$. Занижение оценки PFD_{avg} составляет $3,8 \cdot 10^{-7}$ или 3,4% от значения, рассчитанного по формуле (2).

Метод анализа деревьев неисправностей

Рассмотрим архитектуру дублированного канала 1002, состоящего из идентичных элементов с интенсивностями опасных обнаруженных отказов λ_{du} . Структура 1002 означает, что функция безопасности будет выполнена, если функционирует хотя бы один элемент. Тогда вероятность безотказной работы дублированного канала в предположении экспоненциального распределения наработки до отказа рассчитывается по формуле

$$R_{1002}(t) = 2e^{-\lambda_{du}t} - e^{-2\lambda_{du}t}.$$

Средняя вероятность отказа на межконтрольном интервале [2]

$$\begin{aligned} PFD_{avg\ 1002} &= 1 - \frac{1}{TI} \int_0^{TI} R_{1002}(t) dt = \\ &= 1 - \frac{1}{TI} \int_0^{TI} (2e^{-\lambda_{du}t} - e^{-2\lambda_{du}t}) dt = \\ &= 1 - \frac{2}{\lambda_{du}TI} (1 - e^{-\lambda_{du}TI}) + \frac{1}{2\lambda_{du}TI} (1 - e^{-2\lambda_{du}TI}). \end{aligned} \quad (3)$$

Выражение (3) может быть упрощено при использовании первых двух членов разложения в ряд Тейлора в предположении $\lambda_{du}TI \ll 1$:

$$PFD_{avg\ 1002} \approx \frac{(\lambda_{du}TI)^2}{3}. \quad (4)$$

Выражение для расчета вероятности отказа, которое получается при использовании метода ДН, если в качестве исходных данных для каждого элемента использовать формулу (1), имеет вид

$$PFD_{avg\ 1002\ ДН} \approx \frac{(\lambda_{du}TI)^2}{4}. \quad (5)$$

Заниженное значение средней неготовности объясняется именно тем фактом, что произведение средних не является средним произведения.

Таким образом, для получения корректного консервативного значения средней неготовности дублированного канала, рассчитанного по формуле (4), значение, полученное при структурном моделировании ДН (5),

следует умножить на корректирующий коэффициент, равный 4/3.

Рассмотрим для примера широко используемую в современных системах ПАЗ структуру 2003. Пусть все элементы равнонадежны и имеют одинаковую интенсивность опасных необнаруженных отказов λ_{du} . Структура 2003 означает, что функция безопасности будет выполнена, если функционирует как минимум 2 элемента.

Вероятность безотказной работы голосующей структуры 2003 в предположении экспоненциального распределения наработки до отказа рассчитывается по формуле

$$R_{2003}(t) = 3e^{-2\lambda_{du}t} - 2e^{-3\lambda_{du}t}. \quad (6)$$

Средняя неготовность на межконтрольном интервале есть [2]

$$\begin{aligned} PFD_{avg\ 2003} &= 1 - \frac{1}{TI} \int_0^{TI} R_{2003}(t) dt = \\ &= 1 - \frac{1}{TI} \int_0^{TI} (3e^{-2\lambda_{du}t} - 2e^{-3\lambda_{du}t}) dt = \\ &= 1 - \frac{3}{2\lambda_{du}TI} (1 - e^{-2\lambda_{du}TI}) + \frac{2}{3\lambda_{du}TI} (1 - e^{-3\lambda_{du}TI}). \end{aligned} \quad (7)$$

Выражение (7) может быть упрощено при использовании первых двух членов разложения в ряд Тейлора в предположении $\lambda_{du}TI \ll 1$. Тогда

$$PFD_{avg\ 2003} \approx (\lambda_{du}TI)^2. \quad (8)$$

Консервативная оценка вероятности отказа структуры 2003 при $\lambda_{du}TI \ll 1$ при использовании ДН может быть записана в виде

$$\begin{aligned} PFD_{avg\ 2003\ ДН} &\approx 3PFD_{1002} = \\ &= 3 \cdot \left(\frac{\lambda_{du}TI}{2}\right)^2 = \frac{3}{4}(\lambda_{du}TI)^2. \end{aligned} \quad (9)$$

С учетом выражения (5) для получения корректного консервативного значения средней неготовности структуры 2003 при моделировании ДН необходимо ввести в формулу (9) корректирующий коэффициент, равный 4/3.

Рассмотрим общий случай неидентичных по надежности каналов. Пусть имеется голосующая группа K из N каналов, для которой условием функционирования является отсутствие опасных необнаруженных отказов в K из N каналов, а условием отказа является отказ $N-K+1$ каналов. Можно показать, что для получения консервативной оценки средней неготовности избыточной структуры при использовании ДН следует использовать корректирующие коэффициенты вида [2]

$$K_{PFD\ ДН} = \frac{2^{N-K+1}}{N-K+2}. \quad (12)$$

Корректирующие коэффициенты для некоторых структур K из N представлены в табл. 2.

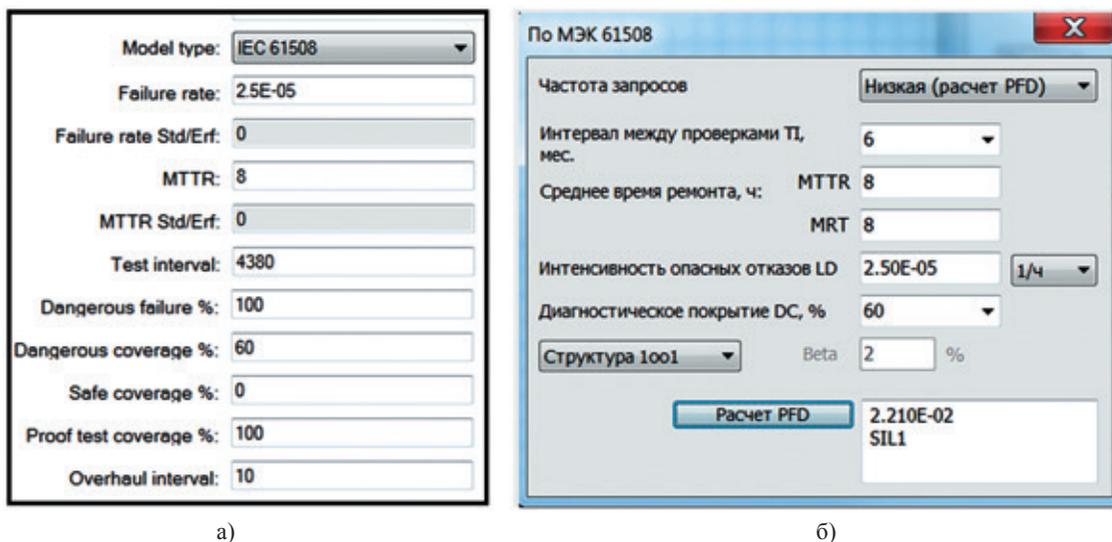


Рис. 1. Экранные интерфейсы программ Isograph Reliability Workbench (а) и ПК АРБИТР (б)

Таблица 2 – Корректирующие коэффициенты для метода ДН

$N - K + 1$	$K_{PFD, ДН}$
2	$4/3 \approx 1,33$
3	2,00
4	$16/5 \approx 3,20$

В современных программных пакетах в качестве исходных данных для моделирования ДН показатели функциональной безопасности $PFD_{avg, 1001}$ рассчитываются по формулам стандарта [1] с помощью встроенных калькуляторов.

На рис. 1 показаны экранные интерфейсы программных пакетов ПК АРБИТР [4] и Isograph Reliability Workbench [5] с инструментами для ввода исходных данных в формате стандарта МЭК 61508.

Учет отказов по общей причине

Современные методы анализа надежности сложных технических систем, обладающих избыточностью, предполагают учет отказов по общей причине [6].

Стандарты серии МЭК 61508 «Функциональная безопасность» рекомендуют использовать при оценке надежности систем ПАЗ бета-модель ООП (модель β -фактора).

Обозначим суммарную (общую) вероятность отказа каждого элемента, входящего в группу ООП, обусловленную как независимыми отказами, так и отказами по общей причине, через q_i^{tot} . Предположим, что элементы могут отказать как по независимой причине с вероятностью q_i^{nez} , так и по общей причине – с некоторой вероятностью $q_i^{ооп}$. В этом случае

$$q_i^{tot} = q_i^{nez} + q_i^{ооп}. \quad (13)$$

При построении ДН исходные данные базисных событий задаются в виде q_i^{tot} , а величины q_i^{nez} и $q_i^{ооп}$ вычисляются по формулам

$$q_i^{nez} = (1 - \beta) q_i^{tot}, \quad (14)$$

$$q_i^{ооп} = \beta q_i^{tot}. \quad (15)$$

Рассмотрим для примера дублированную систему с параметрами [9]:

$$\beta = 1/4, q_1 = q_2 = 3/4.$$

Рассчитаем составляющие вероятности отказа системы согласно (14) и (15) при условии, что статистика по отказам элементов включают в себя независимую составляющую и составляющую ООП, то есть $q_1 = q_2 = q_{ior}$

$$q_1^{nez} = q_2^{nez} = (1 - 1/4) \cdot \frac{3}{4} = 0,5625.$$

$$q_{1,2}^{ооп} = \frac{1}{4} \cdot \frac{3}{4} = \frac{3}{16} = 0,1875.$$

При построении ДН логическая функция такой системы будет иметь вид

$$s = x_1 x_2 \vee \text{ООП}(x_1, x_2). \quad (16)$$

В ортогональной форме логическая функция (16) будет иметь вид

$$s = x_1 x_2 \overline{\text{ООП}(x_1, x_2)} \vee \text{ООП}(x_1, x_2). \quad (17)$$

Вероятностная функция для вычисления вероятности отказа дублированной структуры Q_s , соответствующая (16), будет иметь вид

$$\begin{aligned} Q_{s, ооп} &= q_1^{nez} q_2^{nez} (1 - q^{ооп}) + q^{ооп} = \\ &= 0,5625 \cdot 0,5625 \cdot (1 - 0,1875) + 0,1875 = \\ &= 0,444458. \end{aligned} \quad (18)$$

Без учета ООП вероятность отказа дублированной системы рассчитывается с учетом независимой составляющей вероятности отказа элементов, то есть

$$Q_s = q_1^{nez} q_2^{nez} = 0,5625 \cdot 0,5625 = 0,31640625. \quad (19)$$

Сравнение (18) и (19) показывает, что в соответствии с определением и моделью (13) отказы по общей причине являются дополнительными факторами, снижающими надежность резервированных систем. Поэтому следует считать вывод о повышении надежности при учете ООП [6] физически неправильным и математически некорректным.

Выражения (13), (14) и (15) применяют, в основном, тогда, когда вероятности отказов элементов ПАЗ оцениваются по статистическим, эксплуатационным данным конечных пользователей. При этом предполагается, что статистика общего потока отказов включает в себя как независимые (собственные) отказы изделий, так и отказы, вызванные общими причинами.

При проектном расчете надежности ПАЗ, когда используются справочные данные о надежности компонентов, возможно введение коррекции на «будущие» эксплуатационные ООП. В этом случае общая вероятность отказа рассчитывается по формуле

$$q_i^{tot} = q_i^{np} + q_i^{np}\beta, \quad (20)$$

где q_i^{np} – проектная оценка вероятности отказа i -го элемента ПАЗ, полученная на основе справочных данных о надежности резисторов, конденсаторов, микросхем и т.д.).

Тогда выражение (18) будет иметь вид

$$Q_{s, ооп} = q_1^{np} q_2^{np} (1 - q^{ооп}) + q^{ооп} = 0,75 \cdot 0,75 \cdot (1 - 0,1875) + 0,1875 = 0,64453. \quad (21)$$

Результат (21) является консервативным, что приемлемо при решении задач функциональной безопасности. Определение количественных значений параметра β весьма важно, так как зачастую вклад ООП существенно влияет на оценку PFD_{avg} , от которой зависит назначение или подтверждение уровня полноты безопасности контура ПАЗ. Для иллюстрации влияния количественных значений параметра β на оценку PFD_{avg} рассмотрим несколько примеров из стандарта МЭК 61508-6. В стандарте приведены таблицы с расчетами показателя PFD_{avg} для архитектур 1oo2, 1oo3 и 2oo3.

Для указанных архитектур возможно применение приближенных формул в виде

$$PFD_{avg\ 1oo2} \approx \frac{4}{3}(PFD_{1oo1})^2 + \beta \cdot PFD_{1oo1}, \quad (22)$$

$$PFD_{avg\ 1oo3} \approx 2 \cdot (PFD_{1oo1})^3 + \beta \cdot PFD_{1oo1}, \quad (23)$$

$$PFD_{avg\ 2oo3} \approx 4 \cdot (PFD_{1oo1})^2 + \beta \cdot PFD_{1oo1}. \quad (24)$$

Структура формул (22)–(24) позволяет показать распределение долей вероятности отказа, которые определяются значениями интенсивности опасных необнаруженных отказов λ_{du} – структурная составляющая (первое слагаемое в формулах) и отказов по общим причинам (второе слагаемое в формулах). Например, при $PFD_{avg\ 1oo1} = 6,25 \cdot 10^{-3}$, $\beta = 2$ и 10% распределение причин отказа для архитектуры 1oo2 будет следующим:

$\beta=2\%$:

$$PFD_{avg\ 1oo2} = \frac{4}{3} \underbrace{(6,25e^{-3})^2}_{29,4\%} + \underbrace{0,02 \cdot 6,25e^{-3}}_{70,6\%} = 1,77e^{-4};$$

$\beta=10\%$:

$$PFD_{avg\ 1oo2} \approx \frac{4}{3} \underbrace{(6,25e^{-3})^2}_{7,7\%} + \underbrace{0,1 \cdot 6,25e^{-3}}_{92,3\%} = 6,77e^{-4}.$$

Естественно, что при увеличении значения параметра β определяющим является второе слагаемое в формулах, относящееся к ООП. В этом случае занижение оценки средней неготовности относительно формул стандарта [1] за счет «структурной составляющей» становится незначительным.

На рис. 2 показаны графики изменения относительных величин занижения PFD_{avg} в зависимости от коэффициента β для структур 1oo2 и 2oo3 при трех значениях интенсивности опасных необнаруженных отказов λ_{du} ($2,5 \cdot 10^{-5}$, $2,5 \cdot 10^{-6}$ и $2,5 \cdot 10^{-7}$ 1/ч). Значения PFD_{avg} получены с использованием метода ДН и с коррекцией по формуле (20).

Анализ графиков показывает, что при увеличении значений коэффициента β относительное занижение

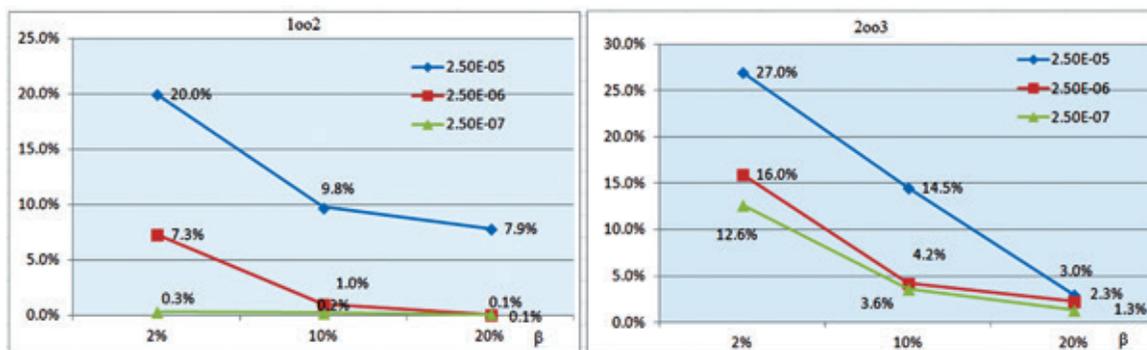


Рис. 2. Относительное занижение оценки PFD_{avg} при расчетах с использованием метода деревьев отказов

оценки PFD_{avg} уменьшается. Кроме того, следует заметить, что относительное занижение особенно проявляется при моделировании ДН менее надежных избыточных структур, показатели которых соответствуют границе диапазона уровня полноты безопасности УПБ1.

На рис. 3 представлены графики зависимости оценок PFD_{avg} для структуры 2oo3 при различных исходных данных в виде значений PFD_{1oo1} для структуры 1oo1. Параметр модели ООП $\beta = 2\%$.

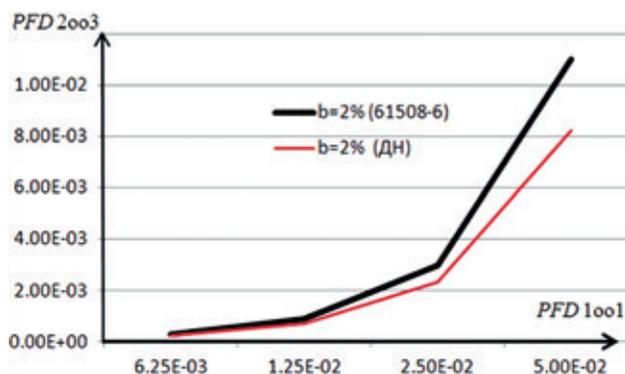


Рис. 3. Оценки параметра PFD_{avg} для структуры 2oo3

На рис. 3 темная кривая отражает результаты использования формулы (24), которая практически совпадает с формулами стандарта МЭК 61508-6. Светлая кривая отражает результаты моделирования надежности ПАЗ с использованием метода ДН. При значениях PFD_{1oo1} меньше $1,25 \cdot 10^{-2}$ (граница интервала для УПБ1) занижение оценки вероятности отказа на запрос для структуры 2oo3 становится незначительным. При более высоких значениях вероятности отказа на запрос элемента ПАЗ оценки надежности структуры разными методами могут привести к совершенно разным результатам. Так при $PFD_{avg_{1oo1}} = 5,5 \cdot 10^{-2}$ результат расчета по формуле (24), а также данные таблиц стандарта МЭК 61508-6, позволяет сделать вывод о соответствии контура ПАЗ УПБ1. Расчеты методом ДН приводят к выводам о соответствии контура УПБ2. Здесь можно сделать вывод, что при моделировании надежности ПАЗ методом ДН, необходимо анализировать как исходные данные о надежности компонентов, так и полученные результаты.

При низкой надежности компонентов, соответствующей верхней границе УПБ1, разумно применять поправочные коэффициенты (12) для получения гарантированной консервативной оценки надежности системы ПАЗ.

Как подчеркивает стандарт МЭК 61508-6, коррекция результатов применения классических логических методов, например, ДН, с теоретической точки зрения не так проста. Поэтому при расчете надежности систем следует глубоко анализировать возможности достижения высокого системного УПБ при относительно низкой надежности компонентов и учете ООП.

Заключение

Таким образом, в настоящей статье проведен анализ возможных ошибок при определении уровня полноты безопасности контура системы ПАЗ, которые могут возникать при использовании метода ДН в коммерческих программных пакетах. Причинами таких ошибок являются, во-первых, завышение надежности компонентов контура ПАЗ за счет применения упрощенной формулы для расчета средней неготовности нерезервированного элемента без учета опасных обнаруженных отказов. Для устранения этой причины следует использовать точные формулы стандарта МЭК 61508-6. Второй причиной является расчет средней неготовности контура с избыточной структурой по средней неготовности его компонентов. Для устранения данной причины следует либо использовать корректирующие коэффициенты, либо рассчитывать именно среднее значение неготовности контура на заданном межконтрольном интервале.

Библиографический список

- ГОСТ Р МЭК 61508. Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 6. 2012. Руководство по применению ГОСТ Р МЭК 61508-2 и ГОСТ Р 61508-3. М.: Стандартинформ, 2014. 110 с.
- Rausand M. Reliability of Safety-Critical Systems: Theory and Applications. Wiley, 2014. 448 p.
- Можаева И.А., Нозик А.А., Струков А.В. Типовые примеры расчета функциональной безопасности систем противоаварийной защиты опасных производственных объектов // Сборник трудов двадцатой Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы защиты и безопасности» том 2, «Средства противодействия терроризму», ФБГУ РАН-Москва, НПО СМ – СПб., 2019. С. 486–494.
- Можаев А.С. Аннотация программного средства «АРБИТР» (ПК АСМ СЗМА) // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика ядерных реакторов». Раздел «Аннотации программных средств, аттестованных Ростехнадзором РФ»: науч.-техн. сб. М.: РНЦ «Курчатовский институт», 2008. Вып. 2/2008. С. 105–116.
- Reliability Workbench – Isograph [Электронный ресурс]. URL: <https://www.isograph.com/software/reliability-workbench/> (Дата обращения 03.08.2022).
- Антонов А.В., Чепурко В.А., Черняев А.Н. Исследование модели учета отказов по общей причине бета-фактора // Надежность. 2019. №2. С. 9–17. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-2-9-17
- Можаева И.А., Струков А.В. Применение ПК АРБИТР для проектной оценки показателей функциональной безопасности систем противоаварийной защиты // В сборнике: Труды 4-й Международной научно-практической конференции «Имитационное и комплексное моделирование морской техники и морских транспортных систем» (ИКМ МТМТС – 2017). С-Петербург, 2017. С. 100–105.

References

1. GOST R IEC 61508. Functional safety of electrical, electronic, programmable electronic safety-related systems. Part 6: Guidelines on the application of IEC 61508-2 and IEC 61508-3. Moscow: Standartinform; 2014. (in Russ.)
2. Rausand M. Reliability of Safety-Critical Systems: Theory and Applications. Wiley; 2014.
3. Mozhaeva I.A., Nozik A.A., Strukov A.V. [Generic examples of functional safety calculation of emergency shutdown systems of hazardous industrial facilities]. In: [Proceedings of the Twentieth All-Russian Research and Practice Conference Topical Problems of Safety and Security, Vol. 2, Counter-Terrorist Measures]. Moscow: RARAN; Saint Petersburg: NPO SM; 2019. Pp. 486-494. (in Russ.)
4. Mozhaev A.S. Annotation for the ARBITR software (PK ASM SZMA). In: [Matters of Nuclear Science and Engineering. Nuclear Reactor Physics Series. Annotations for Rostekhnadzor-Certified Software. A Collection of Research and Engineering Papers]. Moscow: Kurchatov Institute 2008;2:105-116. (in Russ.)
5. <https://www.isograph.com/software/reliability-work-bench/> (accessed 03.08.2022).
6. Antonov A.V., Chepurko V.A., Cherniaev A.N. Research of the beta-factor model of accounting for common cause failures. *Dependability* 2019;2:9-17. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-2-9-17.
7. Mozhaeva I.A., Strukov A.V. [Application of PK ARBITR for engineering assessment of functional safety indicators of emergency shutdown systems]. In: [Proceedings of the 4-th International Research and Practice Conference Simulation of Marine Facilities and Marine Transportation Systems (IKT MTMTS 2017)]. Saint Petersburg; 2017. Pp. 100-105. (in Russ.)

Сведения об авторах

Можаяева Ирина Александровна – кандидат технических наук, ведущий специалист исследователь-

ского отдела ООО «СПИК СЗМА», 26-я линия В.О., д. 15, корп. 2, лит. А, Бизнес-центр «Биржа», Санкт-Петербург, Российская Федерация, 199106, e-mail: irina_mozhaeva@szma.com

Струков Александр Владимирович – кандидат технических наук, доцент, ведущий специалист исследовательского отдела ООО «СПИК СЗМА», 26-я линия В.О., д. 15, корп. 2, лит. А, Бизнес-центр «Биржа», Санкт-Петербург, Российская Федерация, 199106, e-mail: alexander_strukov@szma.com

About the authors

Irina A. Mozhaeva, Candidate of Engineering, Lead Specialist of the Research Unit, SPIK SZMA 15, korp. 2, lit. A 26-ya Liniya Vasilievskogo Ostrova, Birzha Business Centre, 199106, mailto:irina_mozhaeva@szma.com Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: irina_mozhaeva@szma.com

Alexander V. Strukov, Candidate of Engineering, Associate Professor, Lead Specialist of the Research Unit, SPIK SZMA 15, korp. 2, lit. A 26-ya Liniya Vasilievskogo Ostrova, Birzha Business Centre, 199106, mailto:alexander_strukov@szma.com Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: alexander_strukov@szma.com

Вклад авторов в статью

Можаяева И.А. – разработка программы для подготовки и ввода исходных данных в формате требований стандарта ГОСТ Р МЭК 61508, анализ погрешностей при решении задач функциональной безопасности в программной среде ПК АРБИТР.

Струков А.В. – анализ приближенных и упрощенных формул оценки показателей функциональной безопасности для типовых архитектур систем ПАЗ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Анализ UMAP – метода снижения размерности исходных данных в машинном обучении для прогнозирования отказов в локомотивном комплексе

Analysis of UMAP, the method for reducing the dimensionality of initial data in machine learning for the purpose of failure prediction in a motive power service

Проневич О.Б.¹, Клокова А.П.^{1*}
Pronevich O.B.¹, Klokova A.P.^{1*}

¹АО «НИИАС», Москва, Российская Федерация

¹JSC NIIAS, Moscow, Russian Federation

*i@aklokova.ru



Проневич О.Б.



Клокова А.П.

Резюме. Цель. Преобразование признаков является одним из этапов применения методов машинного обучения, оказывающих существенное влияние на качество регрессионных моделей. Целью настоящей статьи является разработка критериев оценки качества снижения размерности данных на этапе преобразования признаков и адаптация метода UMAP к решению задачи прогнозирования количества дней до отказа на локомотивах ОАО «РЖД». **Методы.** Методы преобразования данных делятся на две группы: одни пытаются сохранить глобальную структуру данных, вторые – локальные расстояния между точками. В настоящей статье подробно рассмотрен нелинейный метод снижения размерности UMAP, низкоразмерное представление данных в котором основывается на преобразовании графа ближайших соседей с сохранением структуры данных. Изучение структуры многообразия исходных данных осуществляется с применением методов топологического анализа данных и методами построения нечетких симплицированных множеств.

Результаты. Анализ теоретической базы UMAP, впервые проведенный на русском языке, позволил обоснованно выделить три основных параметра метода, варьирование которых оказывает существенное влияние на вид данных, полученных в результате преобразования. В частности – на качество разделения классов на двумерном пространстве. Также были определены характеристики входного набора параметров, влияющих на результаты UMAP. Продемонстрированы результаты практического применения метода UMAP. На промежуточных этапах: перечень ближайших соседей, взвешенный граф ближайших соседей. Основной результат: низкоразмерное представление данных (из исходных 44 измерений) на двумерном пространстве с разделением классов, что подтверждается как расчетами, так и визуально. **Выводы.** Определено, что UMAP является эффективным и обоснованным методом снижения размерности, позволяющим за счет варьирования параметров преобразовывать данные таким образом, чтобы повысить качество подаваемых на модели машинного обучения данных по критерию «очевидное разделение классов». Преобразование является промежуточным этапом для подготовки данных к применению регрессионных моделей, и разделение классов выполнено для исключения грубых ошибок регрессий.

Abstract. Aim. Feature transformation is one of the stages of machine learning application that has a significant effect on the quality of regression models. The paper aims to develop criteria for evaluating the quality of data dimensionality reduction at the stage of feature transformation and adaptation of the UMAP method to the problem of prediction of the number of days to failure in the locomotives of JSC RZD. **Methods.** The data transformation methods are divided into two groups, those that attempt to preserve the global data structure, and those that attempt to preserve the distances between points. The paper examines in detail the UMAP no-linear method of dimensionality reduction, whose low-dimensional data presentation is based on a transformation of a nearest neighbour graph retaining the data structure. The structure of the initial data manifold is examined using topological data analysis and simplified fuzzy set construction methods. **Results.** The analysis of UMAP theory conducted in the Russian language for the first time enabled a substantiated identification of the three primary parameters of the method, whose variation significantly affects the type of data obtained as the result of a transformation. In particular, that pertains to the quality of class separation over a two-dimensional space. Additionally, the characteristics of the input set of parameters were identified that affect the UMAP results. Practical results of UMAP application were demonstrated. Intermediate results included a list of nearest neighbours, a weighted graph

of nearest neighbours. The fundamental result is a low-dimensional data representation (out of 44 initial measurements) over a two-dimensional space with class separation, which is confirmed both by calculations, and visually. **Conclusions.** It was identified that UMAP is an efficient and substantiated method of dimensionality reduction that allows – through parameter variation – transforming data in such a way as to improve the quality of data submitted to machine learning models by the criterion of “evident class separation”. The transformation is an intermediate stage of data preparation for regression model application, and class separation was performed for the purpose of eliminating the probability of gross regression errors.

Ключевые слова: машинное обучение, снижение размерности, нелинейные методы, преобразование признаков, регрессия, опасные события.

Keywords: machine learning, dimension reduction, non-linear methods, feature transformation, regression, hazardous events.

Для цитирования: Проневич О.Б., Клокова А.П. Анализ UMAP – метода снижения размерности исходных данных в машинном обучении для прогнозирования отказов в локомотивном комплексе. // Надежность. 2022. №4. С. 53-62. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-4-53-62>

For citation: Pronevich O.B., Klokova A.P. Analysis of UMAP, the method for reducing the dimensionality of initial data in machine learning for the purpose of failure prediction in a motive power service. Dependability 2022;4:53-62. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-4-53-62>

Поступила 29.08.2022 / После доработки 24.10.2022 / К печати 15.12.2022

Received on: 29.08.2022 / Revised on: 24.10.2022 / For printing: 15.12.2022.

Введение

Методы машинного обучения успешно применяются для прогнозирования событий на железнодорожном транспорте. В статьях [1-3] рассмотрено решение задач классификации для прогнозирования появления опасного события на объектах пути и электроснабжения железнодорожного транспорта. В этих работах не приводился обзор результатов применения регрессионных моделей, так как с их помощью не удавалось достичь требуемых показателей точности. При моделировании редких событий, когда опасный отказ появляется только в 2% случаев (менее 100 опасных отказов/год на одной железной дороге) методы классификации показывали себя значительно лучше. Однако, используя только методы классификации событий, мы были лишены возможности исследовать такие важные показатели как: количество дней между отказами, вероятность отказа через время Δt . Знание таких показателей позволило бы решать задачи планирования загрузки предприятий, осуществляющих ремонт объектов железнодорожного транспорта, уменьшать время простоя.

Тяговый подвижной состав представляет собой более технически сложное устройство, чем верхнее строение железнодорожного пути (ВСП) и значительная часть объектов железнодорожного электроснабжения, которые были рассмотрены в работах [2-4]. Для классификации событий, связанных с тяговым подвижным составом, разработан обширный «Классификатор опасных отказов технических средств системы КАСАНТ», включающий в себя 469 причин опасных отказов локомотивов и их элементов. Внимание к классификации отказов (нормирование причин и мест отказов) и автоматизированная система сбора информации об отказах – причины, по которым мы облада-

ем значительными статистическими данными об опасных отказах на локомотивах. На выборке 2019–2021 гг. доля отказов составляет 30%, доля опасных отказов приборов безопасности и радиосвязи локомотива – 10,3%. Может показаться, что 10,3% не так далеки от 2%, однако важны не только относительные, но и количественные оценки. Эти 10,3% являются 4964 отказами. Такой объем данных позволяет применять целый ряд методов, которые мы не могли использовать в случаях, когда количество отказов в обучающей выборке не превышало нескольких сотен. В частности, мы можем применять регрессионные модели, поскольку можем перейти от дискретных значений «был отказ / не было отказа» к условно-непрерывной величине «количество дней до отказа». В табл. 1 и 2 приведены данные о среднем количестве дней между опасными отказами приборов безопасности и радиосвязи локомотива для 8 серий локомотивов (серия локомотивов и названия дорог закодированы). Значения «365» или «Не было отказов» означают, что отказы на локомотивах проходили не чаще, чем один раз в год. Одна из причин этого – малое количество эксплуатируемых локомотивов конкретной серии на конкретной дороге.

Как видно из табл. 1 и 2, значение количества дней между отказами (для приборов безопасности, далее – $m_{t_прибор}$) имеет достаточно сильный разброс: от 2,14 до 154,5 и 365 дней. Интересно, что $m_{t_прибор}$ заметно отличается на различных дорогах. Например, для серии 123 $m_{t_прибор}$ равно 15,5 и 68,6 для дорог 1 и 17 соответственно. Причин такого разброса несколько: различия в объеме эксплуатации локомотивов, их числе на дорогах, интенсивности движения, условиях эксплуатации. Все эти факторы необходимо учесть для того, чтобы прогнозировать количество дней до отказа на конкретном локомотиве. Современные автоматизированные системы

Табл. 1 – Среднее количество дней между отказами в 2019 году

Серия	Железная дорога 1	Железная дорога 17	Железная дорога 24	Железная дорога 58	Железная дорога 94
123	7,41	15,5	Не было отказов	Не было отказов	Не было отказов
134	365,0	9,52	Не было отказов	Не было отказов	Не было отказов
226	365,0	35,5	53,83	60,0	365,0
234	56,75	Не было отказов	365,0	Не было отказов	45,0
240	365,0	85,0	3,48	2,14	365,0
510	40,16	365,0	42,5	81,0	365,0
530	7,04	365,0	Не было отказов	35,0	Не было отказов
640	52,83	42,85	67,66	Не было отказов	365,0

Табл. 2 – Среднее количество дней между отказами в 2020 году

Серия	Железная дорога 1	Железная дорога 17	Железная дорога 24	Железная дорога 58	Железная дорога 94
123	10,78	68,6	Не было отказов	Не было отказов	Не было отказов
134	365,0	10,34	Не было отказов	Не было отказов	Не было отказов
226	365,0	150,0	365,0	83,0	365,0
234	365,0	Не было отказов	365,0	Не было отказов	39,0
240	365,0	48,5	5,91	1,99	365,0
510	365,0	365,0	154,5	365,0	365,0
530	13,84	365,0	Не было отказов	35,66	Не было отказов
640	42,2	23,57	48,25	Не было отказов	365,0

диагностирования состояния локомотивов обеспечивают нас данными, необходимыми для решения такой сложной задачи, как разработка модели прогнозирования количества дней до отказа (опасного отказа) на основе множества частных характеристик локомотивов.

При построении моделей машинного обучения (ML) для железнодорожного транспорта, исследователи сталкиваются с такими трудностями, как изменение систем учета в автоматизированных системах управления (АСУ), ошибки данных из-за ручного ввода, отсутствие идентификаторов объектов. Для оценки возможности использования автоматизированной системы управления как источника данных для моделей ML, проводятся отдельные исследования [5].

В Дирекции тяги – филиале ОАО «РЖД» более 5 лет разрабатывается и функционирует доверенная среда – один из проектов программы Цифровизации ОАО «РЖД»¹. В ее основе лежит цифровая платформа для сбора, хранения информации и взаимодействия участников проекта с «озером данных» локомотивного комплекса¹. Локомотивы в доверенной среде однозначно идентифицируются тремя полями, а значит нет ограничений для использования моделей машинного обучения, описанных в [6].

В табл. 3 приведены сведения о данных, взятых в качестве исходных для разработки моделей прогнозирования количества дней до опасного отказа. На их основе были сгенерированы «синтетические» данные путем обработки категориальных признаков, различных вариаций расчета периодичности событий и оценки интенсивности движения для каждого локомотива.

Табл. 3 – Краткие сведения об исходных данных из доверенной среды локомотивного комплекса

№	Вид информации	Первоначальное количество признаков
1	Отказы	10
2	Замеры колесных пар	18
3	Заводские ремонты локомотивов	46
4	Данные о пробегах, составности и состояниях локомотивов из Автоматизированной системы оперативного управления перевозками	252
5	Данные комиссионных осмотров	12
6	Рекламационная работа	20
7	Данные по замечаниям машиниста из АСУ Замечания машинистов	23
8	Нарушения из АСУ Нарушения безопасности движений	36
9	Статус линейного оборудования	20
10	Отказы линейного оборудования	18
11	Ремонты оборудования	14
12	Результаты расследования нарушений	14
13	Изменения инвентарного парка	79
14	Снятое на ремонт оборудование	12

Более 574 признаков – такой объем данных, с одной стороны, кажется перспективным, т.к. повышает вероятность использования значимых признаков. С другой стороны, для использования в качестве входных параметров модели такого количества признаков требуется

¹ <https://gudok.ru/vestnik-cki/?ID=1559003&archive=2021.03.31>

задействование больших вычислительных мощностей и большого времени для обучения модели. Последний фактор существенно затрудняет решения задачи подбора параметров модели для достижения требуемых показателей качества. При работе с такими данными необходимо отдельное внимание уделять этапу отбора и преобразования признаков. Основания цель этого этапа – формирование перечня репрезентативных признаков и исключения данных, не имеющих связи с целевой меткой (количество дней до отказа).

Обзор источников

Существует множество этапов преобразования признаков: очистка [7, 8]; генерация новых признаков (как для целей увеличения количества признаков, так и уменьшения) [9]; отбор признаков и снижение размерности [10]. Мы перечислили ключевые этапы, однако

для каждой задачи формируется свой перечень применяемых методов.

Отбор признаков, характеризующих состояния локомотивов был осуществлен с применением линейной модели, преобразование осуществлялось методом PowerTransformer¹ (функциональное степенное преобразование, чтобы сделать данные более похожими на гауссовы). Алгоритм отбора и преобразования признаков приведен на рис. 1.

После применения алгоритма исключения отобрали 44 признака, однако даже такое количество может неудовлетворительно сказаться на качестве моделей машинного обучения, и это обостряет вопрос применения дополнительных эффективных методов преобразования признаков. Значительная часть моделей

¹ <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.preprocessing.PowerTransformer.html>



Рис. 1. Блок-схема алгоритма исключения неинформативных данных

машинного обучения для железнодорожного транспорта строится для низкоразмерных данных, например, для предиктивного анализа технического состояния систем тепловозов [11], обнаружения неисправностей подшипников качения асинхронного тягового электродвигателя локомотивов [12]. Для прогноза технического состояния газоздушного тракта тепловозного двигателя – всего 7 признаков [13].

К таким дополнительным методам, способным оказать существенное влияние на качество итоговых моделей, являются методы снижения размерности. Их применение позволяет визуализировать результаты отбора признаков, разработать план по устранению ошибок, допущенных при преобразовании исходных данных.

В работах [14, 15] приведены выводы о применении 6-и методов снижения размерности. Результаты исследования [14] показали преимущество нелинейных методов снижения размерности, в особенности, метод равномерного приближения и проекции (*UMAP* от англ. *uniform approximation and projection*), а также *Isomap* (от англ. *Isometric Mapping*) и многомерное шкалирование (*MDS* от англ. *multidimensional scaling*) для выходных пространств малой размерности (2, 4).

Нелинейные методы являются достаточно сложными и не так часто используются исследователями. Самым популярным, в т.ч. по причине доступности интерпретации результатов, является метод главных компонент *PCA* (*PCA* от англ. *principal component analysis*) [16]. Таким образом, можно выделить 3 основных метода снижения размерности: *PCA*, метод стохастического вложения соседей с *t*-распределением (*t-SNE* от англ. *t-distributed stochastic neighbor embedding*) и *UMAP*.

Алгоритмы понижения размерности можно разделить на 2 основные группы: они пытаются сохранить либо глобальную структуру данных, либо локальные расстояния между точками. К первым относятся такие алгоритмы как *PCA* и *MDS*, а ко вторым – *t-SNE*, *Isomap*, *LargeVis* (от англ. *large graph visualization*) и другие. *UMAP* относится именно к последним и показывает схожие с *t-SNE* результаты¹. Ключевые преимущества *UMAP* перед *t-SNE*: скорость вычисления и отсутствие ограничений на размерность исходного пространства признаков, которое необходимо уменьшить.

UMAP является одним из самых молодых методов. Несмотря на то, что он применяется исследователями России с 2018 года², в русской литературе мы не встретили подробного разбора математического аппарата данного метода и этапов его применения. Для эффективного использования каких-либо методов (особенно относящихся к классу нелинейных) необходимо понимать их теоретическую основу и алгоритмы работы.

Среди всех вышеописанных методов мы выделяем *UMAP* по следующим причинам:

- успешное применение *UMAP* другими исследователями;

- демонстрируемая авторами метода возможность без учителя снижать размерность таким образом, чтобы области точек, характеризующие объекты различных классов были разнесены в низкоразмерном пространстве [11, 12];

- более высокая скорость вычисления, по сравнению с другими нелинейными методами;

- отсутствие ограничений на размерность исходного пространства признаков, которое необходимо уменьшить.

Ниже приведена краткая история метода, описан математический аппарат, позволяющий эффективно снижать размерность исходных данных. Эффективность снижения размерности исходных данных мы определяем как показатель пересечения классов (аналог ошибки классификации в задачах классификации). В случае задачи прогнозирования количества дней до появления опасного отказа мы можем выделить два класса событий: событие D – наличие опасного отказа в течение 30 дней и событие \bar{D} – отсутствие отказа в течение 30 дней. Для оценки эффективности снижения размерности мы можем использовать те же показатели, что используются для оценки ошибки бинарной классификации. Таким образом, для подбора параметров *UMAP* для поиска оптимального низкоразмерного представления данных мы можем использовать алгоритмы, применяемые при решении задач классификации. Эту задачу невозможно решить без понимания математического аппарата *UMAP*.

Обзор метода UMAP с результатами применения для решения задачи снижения размерности при оценке состояния локомотивов

Авторы метода *UMAP* – Лиленд Макиннес, Джон Хили, Джеймс Мелвилл – в 2018 году опубликовали большую статью, включающую в себя описание алгоритмов работы метода, математического аппарата, результатов использования [17]. После апробации на практике в 2020 году появился скорректированный алгоритм [18].

Авторы *UMAP* последовательно решают две крупные задачи: изучение структуры многообразия в многомерном пространстве² [18] и поиск низкоразмерного представления данных.

Изучение структуры многообразия осуществляется методами топологического анализа данных и методами построения нечетких симплицированных множеств. В частности, первая задача *UMAP* – построение взвешенного графа *k*-соседей.

Пусть $X = \{x_1, \dots, x_N\}$ – входной набор данных с метрикой (или мерой несходства) $d: X \times X \rightarrow R \geq 0$. Учитывая входной гиперпараметр k , для каждого x_i мы вычисляем множество $\{x_{i_1}, \dots, x_{i_k}\}$ из k ближайших соседей x_i по

¹ <https://habr.com/ru/company/newprolab/blog/350584>

² <https://towardsdatascience.com/umap-dimensionality-reduction-an-incredibly-robust-machine-learning-algorithm-b5acb01de568>

метрике d . Это вычисление может быть выполнено с помощью алгоритма поиска любого ближайшего соседа или приближенного алгоритма поиска ближайшего соседа. Авторы *UMAP* рекомендуют использовать алгоритм спуска к ближайшим соседям из [19]. Для каждого x_i определим ρ_i и σ_i [18, с. 14]:

$$\rho_i = \min \left\{ d(x_i, x_{i_j}) \mid 1 \leq j \leq k, d(x_i, x_{i_j}) > 0 \right\}, \quad (1)$$

где ρ_i – расстояние до ближайшего соседа i -го объекта, и установим σ_i равным такому значению, что

$$\sum_{j=1}^k \exp \left(\frac{-\max(0, d(x_i, x_{i_j}) - \rho_i)}{\sigma_i} \right) = \log_2(k). \quad (2)$$

Такой подход позволяет соединить x_i по крайней мере с одной другой точкой данных с ребром веса 1, это эквивалентно результирующему нечеткому симплицальному множеству, локально связанному в точке x_i . С практической точки зрения это значительно улучшает представление данных очень высокой размерности, когда другие алгоритмы, такие как *t-SNE*, начинают страдать от проклятия размерности [20]. Выбор σ , соответствует (сглаженному) нормировочному коэффициенту, определяющему риманову метрику, локальную в точке x_i .

Но, прежде чем говорить о взвешенном графе, остановимся подробнее на определении ближайших соседей. Одной из концепций *UMAP* является – «сосед моего соседа – мой сосед». При поиске ближайших соседей необходимо определить $n_neighbors$ – количество соседей для вычисления графа k -соседей (входной гиперпараметр, задаваемый исследователем, принимает целые значения) и *metric* – метрику для оценки расстояния между наблюдениями. На основании этих параметров строятся графы¹ k -соседей (число соседей равно $n_neighbors$) и осуществляется поиск ближайшего соседа. Выбор метода поиска ближайшего соседа является вопросом отдельного исследования, однако авторы *UMAP* рекомендуют использовать метод, приведенный в работе [19]. Для реализации положений, изложенных в статье Дон Вэйя, Чарикара Мозеса и Кай Ли [19] создана библиотека *PyNNDescent*⁴. В результате на основании исходного массива размера $n \times m$ (n – количество строк, m – количество признаков данных) формируется новый массив размера $n \times n_neighbors$. Каждая строка содержит в себе индексы $n_neighbors$ ближайших соседей, т.е. *PyNNDescent* формирует n наборов данных. При этом одно наблюдение может состоять в разных наборах ближайших соседей. Продемонстрируем на практике работу *PyNNDescent*. Исходный массив данных содержит информацию о состояниях секций локомотивов и имеет размеры: 230475×44 , где 44 – количество параметров, по которым оценивается локомотив, 230475 – число наблюдений. Пример данных с закодированными названиями столбцов приведен в табл. 4.

Табл. 4 – Исходный массив данных

Index	X1	X2	X3	X4		X42	X43	X44
0	1,0	46,0	0,0	10,0	...	10,0	865,0	3250,0
1	0,0	42,0	0,0	10,0		10,0	861,0	3250,0
2	0,0	10,0	1,0	10,0		10,0	146,0	3080,0
3	0,0	10,0	0,0	10,0		10,0	146,0	3080,0
4	0,0	18,0	0,0	5,0		5,0	316,0	3080,0

Наблюдение с индексом 1 попало в 57 наборов ближайших соседей. Пример соседей наблюдения 1 из набора № 19 приведен в табл. 5.

Табл. 5 – Примеры ближайший соседей в наборе №19

Index	X1	X2	X3	X4	...	X42	X43	X44	
Состояния исходного наблюдения									
1	0,0	42,0	0,0	10,0	...	10,0	861,0	3250,0	
Соседи									
0	1,0	46,0	0,0	10,0		10,0	865,0	3250,0	
17	0,0	42,0	0,0	10,0		10,0	928,0	3080,0	

Далее осуществляется построение связующего дерева. Учитывая входной гиперпараметр k , для каждого x_i мы вычисляем множество $\{x_{i_1}, \dots, x_{i_k}\}$ из k ближайших соседей x_i по метрике d . Метрика d , так же, как и k , задается исследователем. Вопрос выбора оптимальных значений d и k является предметом отдельного исследования и будет рассматриваться в других статьях, продолжающих настоящую работу.

Для этого необходимо определить взвешенный ориентированный граф $G^- = (V, E, w)$. Вершины V графа G^- образуют множество X . Тогда мы можем сформировать множество направленных ребер $E = \left\{ (x_i, x_{i_j}) \mid 1 \leq j \leq k, 1 \leq i \leq N \right\}$, и определить вес v_{ji} ребра

$$v_{ji} = \exp \left(\frac{-\max(0, d(x_i, x_{i_j}) - \rho_i)}{\sigma_i} \right), \quad (3)$$

где $d(x_i, x_{i_j})$ – расстояние между объектами;

x_i – объект наблюдения;

x_{i_j} – j -ый ближайший сосед x_i объекта наблюдения;

ρ_i и σ_i – описаны выше.

При построении взвешенного ориентированного графа, между вершинами могут существовать два ребра с разными весами. Вес ребра интерпретируется как вероятность существования данного ребра, направленного от одного объекта к другому. Исходя из этого, ребра между двумя вершинами объединяются в одно с весом, равным вероятности существования хотя бы одного ребра:

$$w(x_i, x_j) = w(x_i \rightarrow x_j) + w(x_j \rightarrow x_i) - w(x_i \rightarrow x_j) \cdot w(x_j \rightarrow x_i). \quad (4)$$

¹ <https://github.com/lmcinnes/pynndescent>

Таким образом, алгоритм получает взвешенный неориентированный граф.

На рис. 2 приведен пример такого графа состояний электровоза.



Рис. 2. Взвешенный граф ближайших соседей для электровозов

Шаг 2 – Поиск низкоразмерного представления

Основная задача поиска низкоразмерного представления – вычисление нечеткого топологического представления. В *UMAP* сила притяжения между двумя вершинами i и j с координатами y_i и y_j (точки взвешенного графа H , подробнее ниже) соответственно определяется по формуле:

$$\frac{-2ab \|y_i - y_j\|_2^{2(b-1)}}{1 + \|y_i - y_j\|_2^{2b}} w((x_i, x_j))(y_i - y_j), \quad (5)$$

где w_{ij} – низкоразмерное сходство, определяется выражением (6):

$$w_{ij} = \left(1 + a \|y_i - y_j\|_2^{2b}\right)^{-1}, \quad (6)$$

где y_i, y_j – координаты вершин i и j ; a, b – являются гиперпараметрами, задаваемыми и варьируемыми исследователем. По умолчанию в алгоритме *UMAP* используются следующие начальные значения: $a \approx 1,929$ и $b \approx 0,7915$. Далее a, b выбираются нелинейным методом наименьших квадратов против кривой $\Psi: R^d \times R^d \rightarrow [0, 1]$, где:

$$\Psi(y_i, y_j) = \begin{cases} 1, & \|y_i - y_j\|_2 \leq \min_dist; \\ \exp(-\|y_i - y_j\|_2 - \min_dist), & \text{иначе} \end{cases} \quad (7)$$

где \min_dist – минимальное расстояние, на котором точки могут находиться друг от друга в низкоразмерном

представлении (значение задается исследователем, по умолчанию 0,1).

Силы отталкивания рассчитываются путем выборки из-за вычислительных ограничений. Таким образом, всякий раз, когда к ребру прикладывается сила притяжения, одна из вершин этого ребра отталкивается выборкой других вершин. Сила отталкивания определяется выражением:

$$\frac{2b}{\left(\epsilon + \|y_i - y_j\|_2^2\right)\left(1 + a \|y_i - y_j\|_2^{2b}\right)} (1 - w((x_i, x_j)))(y_i - y_j), \quad (7)$$

где ϵ – небольшое число для предотвращения деления на ноль (0,001 в текущей реализации).

Силы, описанные выше, получены из градиентов, оптимизирующих перекрестную энтропию по ребрам между взвешенным графом G и эквивалентным взвешенным графом H , построенным из точек $\{y_i\}_{i=1 \dots N}$. Цель авторов *UMAP* – расположить точки y_i так, чтобы взвешенный граф, индуцированный этими точками, наиболее близко приближался к графу G , где измеряется разница между взвешенными графами по суммарной кросс-энтропии по всем вероятностям существования ребра. Поскольку взвешенный граф G фиксирует топологию исходных данных, эквивалентный взвешенный граф H , построенный из точек $\{y_i\}_{i=1 \dots N}$, соответствует топологии настолько точно, насколько позволяет оптимизация, и, таким образом, обеспечивает хорошее низкоразмерное представление общей топологии данных.

Задача поиска w_{ij} решается путем минимизации функции стоимости C_{UMAP} , которая также является перекрестной энтропией.

$$C_{UMAP} = \sum_{i \neq j} \log\left(\frac{v_{ij}}{w_{ij}}\right) + (1 - v_{ij}) \log\left(\frac{1 - v_{ij}}{1 - w_{ij}}\right), \quad (8)$$

где w_{ij} – см. (5); v_{ij} определяется выражением:

$$v_{ij} = (v_{j|i} + v_{i|j}) - v_{j|i} v_{i|j}, \quad (9)$$

где $v_{j|i}$ – представляют собой локальное нечеткое симплициальное членство во множестве, основанное на гладких расстояниях ближайших соседей (формула (3)).

Результат представления взвешенного графа ближайших соседей, характеризующего состояния электровозов, на двумерном пространстве приведен на рис. 3. На рис. 3 показаны точки, соответствующие состояниям секций локомотивов: красным цветом – для секций, на которых в течение 30 дней после фиксирования состояния (сбора данных) были отказы, зеленым цветом – для секций, на которых в течение аналогичного периода не было отказов. Числа по осям X и Y не имеют физического смысла, поэтому оси условно обозначены как парам_1 (параметр 1) и парам_2 (параметр 2).

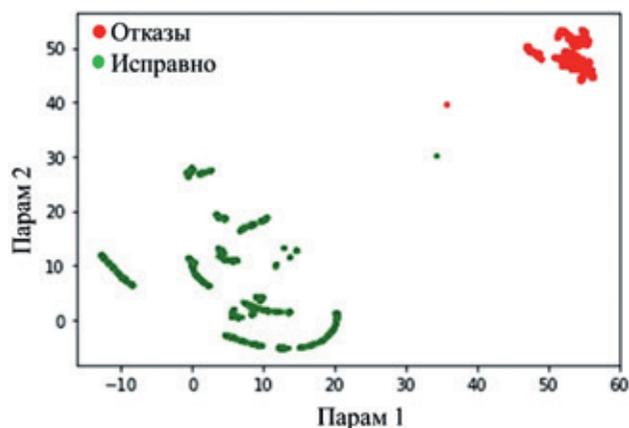


Рис. 3. Низкоразмерное представление данных о состояниях электровозов. Расстояние *jaccard*

Как видно из рис. 3, явно есть наборы точек, однозначно соответствующие состояниям секций локомотивов, предшествующих отказу. Также есть область зеленых – «безопасных» точек. Области зеленых и красных точек имеют пересечения. Всего в выборке 15247 наблюдений. Из них 6158 – «красные» (класс «отказ»), 9089 – «зеленые» (класс «отсутствие отказа»).

На «территории» красных точек оказалось 7 зеленых (меньше 0,1% от общего числа зеленых точек), среди зеленых – 4 красных точки (меньше 0,1%). Таких показателей мы добились путем настройки гиперпараметров *UMAP* и применения методов нормализации исходных данных. Этому исследованию будет посвящена отдельная статья, здесь мы хотим продемонстрировать достигнутые результаты. Анализ математического аппарата позволил нам определить перечень параметров, варьирование которых позволило получить вышеизложенные результаты. В качестве основных параметров выделены:

- 1) $d(x_i, x_j)$ – метрика оценка расстояния между наблюдениями x_i и x_j ;
- 2) $n_neighbors$ – количество соседей;
- 3) min_dist – минимально расстояние, на котором точки могут находиться друг от друга в низкоразмерном представлении;
- 4) характеристики входного набора параметров:
 - a. количество признаков;
 - b. нормирование признаков;
 - c. баланс классов.

Первые три параметра из списка – важнейшие варьируемые признаки *UMAP*, это указано в документации¹ на метод. Понимание того, каким образом они влияют на итоговый результат, оказывает ключевое влияние на результаты моделирования. В частности, *UMAP* предусматривает возможность использования собственных метрик $d(x_i, x_j)$, не входящих в базовый набор.

По своей сути *UMAP* относится к классу методов обучения без учителя, однако очевидно, что лучших показателей качества регрессионных моделей мы достигнем, если на вход будем подавать данные, в которых

классы максимально разделены. Такой подход позволяет минимизировать число ошибок, связанных с неверной оценкой событий, когда отказа не было.

Выводы и перспективы исследования

В рамках настоящей статьи мы рассмотрели математический аппарат метода снижения размерности *UMAP*, основанного на построении графа ближайших соседей и поиске низкоразмерного представления данных – на двумерном пространстве. В ходе преобразования теряется физический смысл осей, однако в новом пространстве сохраняется структура данных (это можно увидеть, соотнеся рис. 2 и 3). В статье впервые на русском языке изложен математический аппарат *UMAP*, определены параметры, варьирование которых позволяет адаптировать метод к решению задачи прогнозирования количества дней до отказа.

На рис. 3 приведен пример низкоразмерного представления данных о состояниях электровозов, где в качестве метрики расстояния использована метрика *jaccard*, а к исходным данным применялись методы отбора признаков и нормирования. После анализа теоретической базы и первых расчетов определено, что *UMAP* является эффективным методом снижения размерности, т.к. он позволяет «дистанцировать» друг от друга классы событий. Для оценки эффективности снижения размерности исходных данных предложено использовать показатели пересечения классов (аналог ошибки классификации в задачах классификации).

Перспективы исследования для достижения цели повышения качества регрессионных моделей прогнозирования количества дней до отказа:

- 1) Варьирование параметров *UMAP* для решения задачи разделения локомотивов на классы: «отказ вида N / отсутствие отказа вида N ». Интерпретация результатов и разработка алгоритма подбора параметров для «лучшего» разделения классов;
- 2) Обучение регрессионных моделей на данных из низкоразмерного представления и разработка алгоритма интерпретации результатов;
- 3) Обобщение результатов и разработка общего алгоритма построения регрессионных моделей с применением методов разделения классов на этапе отбора и преобразования признаков.

Библиографический список

1. Шубинский И.Б., Проневич О.Б. Методы интеллектуального анализа данных для прогнозирования опасных событий // Железнодорожный транспорт. 2021. № 12. С. 27-31.
2. Проневич О.Б., Зайцев М.В. Интеллектуальные методы повышения точности прогнозирования редких опасных событий на железнодорожном транспорте // Надежность. 2021. Т. 21. № 3. С. 54-65. DOI: 10.21683/1729-2646-2021-21-3-54-65

¹ <https://umap.scikit-tda.org/parameters.html>

3. Применение методов машинного обучения для прогнозирования опасных отказов объектов железнодорожного пути / И.Б. Шубинский, А.М. Замышляев, О.Б. Проневич, А.Н. Игнатов, Е.Н. Платонов // Надежность. 2020. Т. 20. № 2. С. 43-53. DOI: 10.21683/1729-2646-2020-20-2-43-53

4. Платонов Е.Н., Просвирин К.В. Прогнозирование дефектов верхнего строения железнодорожного пути методами машинного обучения // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2022. Т. 19. № 2. С. 8-18. DOI: 10.14489/vkit.2022.02.pp.008-018

5. Корнеева Е.В. Сидоренко В.Г. Анализ применимости термина Big Data к автоматизированной системе оперативного управления перевозками // Наука и техника транспорта. 2022. № 1. С. 70-76.

6. Устич П.А., Иванов А.А., Мажидов Ф.А. Применение информационных технологий в системе технического обслуживания и ремонта вагонов // Автоматизация. Современные технологии. 2016. № 10. С. 29-38.

7. Калайдин Е.Н., Пиронко М.Д. Особенности сбора и обработки данных для построения моделей машинного обучения // Актуальные проблемы экономической теории и практики: сборник научных трудов / под редакцией В.А. Сидорова. Краснодар, 2020. С. 116-123.

8. Тимченко Е.А. Проблемы предпочтительности данных // Молодежная наука – развитию агропромышленного комплекса: материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Курск, 3-4 декабря 2020 г. С. 263-269.

9. Акимов А.А., Валитов Д.Р., Кубряк А.И. Предварительная обработка данных для машинного обучения // Научное обозрение. Технические науки. 2022. № 2. С. 26-31. DOI: 10.17513/srts.1391

10. Анализ существующих методов снижения размерности входных данных / С.Д. Ерохин, Б.Б. Борисенко, И.Д. Мартишин, А.С. Фадеев // Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 1. С. 30-37. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-1-30-37

11. Федотов М.В., Грачев В.В. Предиктивная аналитика технического состояния систем тепловозов с использованием нейросетевых прогнозных моделей // Бюллетень результатов научных исследований. 2021. № 3. С. 102-114. DOI: 10.20295/2223-9987-2021-3-102-114.

12. Хамидов О.Р., Грищенко А.В. Обнаружение неисправностей подшипников качения асинхронного тягового электродвигателя локомотивов на основе современных интеллектуальных методов // Вестник транспорта Поволжья. 2020. № 1 (79). С. 35-41.

13. Диагностирование газозоодушного тракта теплового дизеля с использованием интеллектуального классификатора / В.В. Грачев, М.В. Федотов, А.В. Грищенко, Ф.Ю. Базилевский, А.Л. Шарапов // Бюллетень результатов научных исследований. 2022. № 2. С. 124-140. DOI: 10.20295/2223-9987-2022-2-124-140

14. Ефименко Е.Ю., Мясников Е.В. Оценка методов снижения размерности в задаче распознавания личности по походке // Сборник трудов по материалам VII

Международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ 2021), Самара, 20-24 сентября 2021. Самарский университет, 2021. Т. 2. С. 159-160.

15. Горбунова А.А. Сравнительный анализ алгоритмов снижения размерности данных для исследования экспрессии генов // 77-я научная конференция студентов и аспирантов Белорусского государственного университета: материалы конференции в 3 ч., Минск, 11–22 мая 2020 года. Минск: Белорусский государственный университет, 2020. С. 161-164.

16. Кулагин М.А. Интеллектуальная система анализа и прогнозирования нарушений при управлении подвижным составом: дис. ... канд. техн. наук: 2.9.8. М., 2022. 229 с.

17. Leland McInnes, John Healy, James Melville. UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension Reduction [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/1802.03426.pdf>, свободный (дата обращения 03.10.2022). DOI: 10.48550/arXiv.1802.03426

18. Leland McInnes, John Healy, James Melville. UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension Reduction // arXiv. — 2020. — 21 September. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1802.03426>

19. Wei Dong, Charikar Moses, Kai Li. Efficient k-nearest neighbor graph construction for generic similarity measures // Conference: Proceedings of the 20th international conference on World wide web, March 28–April 1, 2011. Hyderabad, India, 2011. Pages 577–586. DOI: 10.1145/1963405.1963487

20. Kai Ming Ting, Takashi Washio, Ye Zhu et al. Breaking the curse of dimensionality with Isolation Kernel [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://arxiv.org/pdf/2109.14198.pdf>, свободный (дата обращения 03.10.2022). DOI: 10.48550/arXiv.2109.14198

References

1. Shubinsky I.B., Pronevich O.B. [Methods of deep learning for hazard prediction]. *Zheleznorodozhny transport* 2021;12:27-31. (in Russ.)

2. Pronevich O.B., Zaytsev M.V. Intelligent methods for improving the accuracy of prediction of rare hazardous events in railway transportation. *Dependability* 2021;21(3):54-65. DOI: <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-3-54-65>

3. Shubinsky I.B., Zamyshlyayev A.M., Pronevich O.B., Platonov E.N., Ignatov A.N. Application of machine learning methods for predicting hazardous failures of railway track assets. *Dependability* 2020;2:45-53. DOI: <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-2-43-53>

4. Platonov E.N., Prosvirin K.V. Prediction of track structure defects by machine learning methods. *Herald of computer and information technologies* 2022;19(2):8-18. DOI: 10.14489/vkit.2022.02.pp.008-018 (in Russ.)

5. Korneeva E.V., Sidorenko V.G. Analysis of big data term applicability to automated system of transportation

operational control. *Science and Technology in Transport* 2022;1:70-76. (in Russ.)

6. Ustich P.A., Ivanov A.A., Mazhidov F.A. Application of information technology in the cars technical maintenance system and repair. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii* 2016;10:29-38. (in Russ.)

7. Kalaydin E.N., Pironko M.D. [Specificity of the collection and processing of data for the purpose of construction of machine learning models]. In: Sidorov V.A., editor. [Topical issues of economic theory and practice. Collected science papers]. Krasnodar; 2020. P. 116-123. (in Russ.)

8. Timchenko E.A. [Matters of preliminary data cleansing]. In: [Young Science for the Development of Agriculture. Proceedings of the All-Russian (National) research and practice conference of undergraduate, postgraduate students and young scientists]; 2020:263-269. (in Russ.)

9. Akimov A.A., Valitov D.R., Kubryak A.I. Data preprocessing for machine learning. *Scientific Review. Technical science* 2022;2: 26-31. DOI: 10.17513/srts.1391 (in Russ.)

10. Erokhin S.D., Borisenko B.B., Martishin I.D., Fadeev A.S. Analysis of existing methods to reduce the dimensionality of input data. *T-Comm* 2022;16(1):30-37. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-1-30-37 (in Russ.)

11. Fedotov M.V., Grachev V. V. Predictive analytics of the technical condition of diesel locomotive systems using neural network predictive models. *Bulletin of Scientific Research Results* 2021;3:102-114. DOI 10.20295/2223-9987-2021-3-102-114. (in Russ.)

12. Khamidov O.R., Grishchenko A.V. [Detecting faults in rolling bearings of asynchronous traction electric motors of locomotives using modern AI-based methods]. *Vestnik transporta Povolzhya* 2020;1(79):35-41. (in Russ.)

13. Grachev V.V., Fedotov M.V., Grizhshenko A.V., Bazilevskiy F.Yu., Sharapov A.L. Locomotive Diesel Gas-Air Tract Diagnostics with the Use of Intellectual Classifier. *Bulletin of Scientific Research Results* 2022;2:124-140. DOI 10.20295/2223-9987-2022-2-124-140. (in Russ.)

14. Efimenko E.Yu., Miasnikov E.V. [Evaluating the methods of dimensionality reduction as part of identity recognition by the walk]. In: Miasnikov V.V., editor. [Proceedings of the VII International Conference and Youth School]. Samara; 2021. (in Russ.)

15. Gorbunov A.A. [Comparative analysis of the data dimensionality reduction algorithms as part of gene expression research]. In: [Proceedings of the 77-th Science Conference of the Undergraduate and Postgraduate Students of the Belarusian State University in 3 volumes]. Minsk; 2020. P. 161-164. (in Russ.)

16. Kulagin M.A. [An AI-based system for analysing and predicting train control violations: a Candidate of Engineering Thesis]. Moscow; 2022. (in Russ.)

17. McInnes L., Healy J., Melville J. UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension

Reduction. arXiv; 2018. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1802.03426>

18. McInnes L., Healy J., Melville J. UMAP: Uniform Manifold Approximation and Projection for Dimension Reduction. arXiv; 2020. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1802.03426>

19. Dong W., Moses C., Li K. Efficient k-nearest neighbor graph construction for generic similarity measures. In: Proceedings of the 20th international conference on World wide web; 2011. P. 577-586. DOI: 10.1145/1963405.1963487

20. Ting K.M., Washio T., Zhu Y., Xu Y. Breaking the curse of dimensionality with Isolation Kernel. arXiv; 2021. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.14198>

Сведения об авторах

Проневич Ольга Борисовна – кандидат технических наук, руководитель проектов отдела постановки задач, внедрения и сопровождения системных разработок отделения управления рисками сложных технических систем АО «НИИАС», Москва, Российская Федерация, e-mail: obpronevich@gmail.com

Клокова Анна Павловна – аспирант, Российский университет транспорта РУТ (МИИТ); специалист отделения управления рисками сложных технических систем АО «НИИАС», Москва, Российская Федерация, e-mail: i@aklokova.ru

About the authors

Olga B. Pronevich, Candidate of Engineering, Project Manager, Unit for Problem Definition, Deployment and Support of System-Level Designs, Division for Risk Management of Complex Technical Systems, JSC NIIAS, Moscow, Russian Federation, e-mail: obpronevich@gmail.com

Anna P. Klokova, Postgraduate Student, Russian University of Transport RUT (MIIT), Specialist, Division for Risk Management of Complex Technical Systems, JSC NIIAS, Moscow, Russian Federation, e-mail: i@aklokova.ru

Вклад авторов в статью

Проневич О.Б. Постановка задачи, проведен обзор и анализ математического *UMAP*, определены ключевые параметры *UMAP*, оказывающие влияние на результаты снижения размерности.

Клокова А.П. Проведен обзор методов снижения размерности и обоснован выбор *UMAP* как основного метода снижения размерности, разработан алгоритм отбора признаков и проведения нормировки до применения *UMAP*, разработан пример применения *UMAP* для снижения размерности данных, характеризующих состояние электровозов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Итоги Четвертой Евразийской конференции РИСК-2022 «Инновации в минимизации природных и техногенных рисков»

11-13 октября 2022 года, Баку, АЗЕРБАЙДЖАН

11-13 октября 2022 года в Баку состоялась Четвертая Евразийская конференция «Инновации в минимизации природных и техногенных рисков» (РИСК-2022).

Конференция была организована Международной компанией организатора мероприятий AMIR Technical Services LLC, которая является ассоциативным членом World Conference Alerts. Со-организаторами мероприятия выступили Архитектурно-Строительный университет Азербайджана, Грузинский Технический университет, Гонконг Сити университет, Международная группа по надёжности Гнеденко Форум при поддержке Евразийской СЕЙСМО Ассоциации.

Первая конференция под трендом «РИСК» состоялась 22-24 мая 2019 года, в г. Баку (Азербайджан); в ней принимали участие ученые и специалисты из 26 стран, включая Россию. Во второй конференции 12-19 апреля 2020 года, которая состоялась в г. Тбилиси (Грузия) приняли участие ученые и эксперты из 34 стран. Третья конференция РИСК-2021 также состоялась в городе Тбилиси (Грузия), 7-9 декабря 2021 года. Несмотря на

все сложности пандемии КОВИД-19 на конференции участвовали ученые и специалисты из 30 стран.

Из-за пандемии конференций 2020, 2021 годов вторая и третья конференции прошли в режиме онлайн конференции с использованием дистанционных технологий.

Успехи мирового сообщества в борьбе с пандемией КОВИД-19, позволили организовать Четвертую Евразийскую конференцию РИСК-2022 в очном формате, с 11 по 13 октября в Баку (Азербайджан). В рамках конференции РИСК-2022 был организован Симпозиум на тему «Технологические, экологические и экономические риски нефтегазовой сферы», а также выставка монографий и книг по вопросам оценки, анализа и управления рисков.

Основной целью всех мероприятий серии «РИСК» является:

- распространение «know-how» знаний и технологий по инновационным подходам в минимизации рисков, а также
- поддержка Сендайской рамочной программы действий ООН по снижению риска бедствий на 2015–2030 гг. в качестве руководящего базового до-



кумента, в котором отражены стратегические цели и приоритетные направления действий, а также ожидаемые результаты.

После приветственных посланий председателя конференции и ректора Азербайджанского Архитектурно-Строительного университета, делегатов стран-участников были заслушаны приглашенные доклады профессора Энрико Зио (Италия), Лауреата Нобелевской Премии мира (2007), профессора Святослава Тимашева (США и Россия), профессора Михаила Гельфгата (Австрия), профессора Лиа Мачавариани (Грузия), а также представительницы компании Planet Labs Berlin GmbH, г-жи Ольга Граничи (Германия).

На конференции РИСК-2022 бурно обсуждались насущные проблемы минимизации рисков, после чего принята Резолюция.

РЕЗОЛЮЦИЯ:

Мы, участники 4-й Евразийской конференции и симпозиума «Инновации в минимизации природных и технологических рисков», обсудив и обобщив международный опыт традиционных и инновационных подходов к анализу, оценке и управлению природными и технологическими рисками:

1. Заявляем о достижении основных целей конференции РИСК-2022 в части:

- объединения ученых и специалистов в области анализа, оценки и управления природными и техногенным рисками и предоставления им возможности обмена информацией, идеями и инновационными решениями;
- содействия передаче инновационных и передовых знаний о природных и техногенных рисках, и технологиях их минимизации;
- содействия взаимопониманию и профессиональному взаимодействию ученых, специалистов и организаций в целях развития теории и совершенствования лучших практик минимизации природных и техногенных рисков;
- углубления сотрудничества и взаимопонимания между субъектами промышленности, научными и академическими учреждениями в вопросах анализа, оценки и управления природными и техногенным рисками;

- поддержки Сендайской (Япония) рамочной программы действий ООН по снижению риска бедствий на 2015–2030 гг. в качестве руководящего базового документа, отражающего стратегические цели и приоритетные направления действий, а также ожидаемые результаты по более глубокому пониманию риска бедствий во всех его аспектах;

- выявления инновационных подходов к идентификации различного вида опасностей природного и антропогенного характера, методам их анализа и оценки и методам принятия управленческих решений, обеспечивающих безопасность проживания населения и устойчивое социально-экономическое развитие различных регионов Евразийского континента.

2. Подтверждаем приверженность активной позиции в формировании национальных и межгосударственных механизмов обеспечения безопасности населения и территорий и считаем важным вовлечение в работу по анализу, оценке рисков и управлению ими всех заинтересованных сторон.

3. Выражая озабоченность масштабом потерь от аварий и бедствий, вызванных природными и техногенными катастрофами, призываем к объединению усилий учёных и специалистов Евразийских стран для повышения эффективности и ответственности решений по минимизации рисков чрезвычайных ситуаций природного и антропогенного характера.

Учитывая согласное мнение участников конференции, выражаем поддержку предложений председателя конференции о следующем:

– очередную 5-ую Евразийскую конференции «РИСК-2023» по традиции провести в г. Баку (Азербайджан), во второй половине 2023 года.

Профессор Вугар АЛИЕВ
Председатель Организационного Комитета
Конференции РИСК-2022
11-13 октября, 2022 года
Баку, АЗЕРБАЙДЖАН
www.eurasianrisk2022.com/
www.konferencii.ru/info/140361



GNEDENKO FORUM

INTERNATIONAL GROUP ON RELIABILITY

The Gnedenko e-Forum has been established by the International Group On Reliability (I.G.O.R.). The Forum is named after outstanding probabilist and statistician Boris Vladimirovich Gnedenko. The I.G.O.R.'s purpose is promoting contacts between members of the World Reliability community and assisting professional news and information [new publications, forthcoming events, etc.].

Gnedenko Forum основан в 2004 году неофициальной международной группой экспертов в области теории надёжности для профессиональной поддержки исследователей всего мира, заинтересованных в изучении и развитии научных, технических и пр. аспектов теории надёжности, анализа рисков и безопасности в теоретической и прикладной областях.

Форум создан в сети Интернет как некоммерческая организация. Его цель – привлечь к совместному обсуждению и общению технических специалистов, заинтересованных в развитии теории надёжности, безопасности и анализа рисков, независимо от места их проживания и принадлежности к тем или иным организациям.

Форум выступает в качестве объективного и нейтрального лица, распространяющего научную информацию для прессы и общественности по вопросам, касающимся безопасности, анализа риска и надёжности сложных технических систем. Он опубликует обзоры, технические документы, технические отчеты и научные эссе для распространения знаний и информации.

Форум назван в честь Бориса Владимировича Гнеденко, выдающегося советского математика, специалиста в области теории вероятностей и её приложений, академика Украинской академии наук. Форум является площадкой для распространения информации о стипендиях, академических и профессиональных позициях, открывающихся в профессиональной области надёжности, безопасности и анализа рисков по всему миру.

В настоящее время в Форуме состоят 500 участников из 47 стран мира.

Начиная с января 2006 года, Форум выпускает свой ежеквартальный журнал *Reliability: Theory & Applications* (www.gnedenko.net/RTA). Журнал зарегистрирован в Библиотеке Конгресса США (ISSN 1932-2321) и публикует статьи, критические обзоры, воспоминания, информацию и библиографии на теоретические и прикладные аспекты надёжности, безопасности, живучести, технического обслуживания и методы анализа и управления рисками.

С 2017 года журнал индексируется в международной базе Scopus.



Членство в GNEDENKO FORUM не подразумевает никаких обязательств. Достаточно прислать по адресу a.bochkov@gmail.com свою фотографию и краткую профессиональную биографию (резюме). Образцы можно найти на <http://www.gnedenko.net/personalities.htm>

ТРЕБОВАНИЯ РЕДАКЦИИ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛАХ ИЗДАТЕЛЬСКОЙ ГРУППЫ IDT PUBLISHERS

Требования к формату статьи

Статья представляется в редакцию в электронном формате, в виде файла, созданного в текстовом редакторе MS Word из пакета Microsoft Office (файл с расширением *.doc или *.docx). Текст набирается черным шрифтом на листе формата А4 с полями: левое, верхнее, нижнее – 2 см; правое – 1,5 или 2 см. Минимальный объем статьи – 5 страниц, максимальный (может быть увеличен по согласованию с редакцией) – 12 страниц. При этом статья включает структурные элементы, описание которых представлено ниже.

Структура материала статьи

Представленные ниже структурные элементы статьи отделяются друг от друга *пустой строкой*. Отдельные примеры оформления, как это должно выглядеть в тексте, выделены *синим шрифтом*.

1) Название статьи

Название статьи представляется на русском и английском языках. Название статьи на русском языке должно соответствовать содержанию статьи. Англоязычное название должно быть грамотно с точки зрения английского языка, при этом по смыслу полностью соответствовать русскоязычному названию.

Оформление: Текст названия набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, межстрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «полужирный». Точка в конце не ставится.

Пример:

Повышение надежности электронных компонентов
The Increasing of dependability of electronic components

2) Фамилия И.О. автора (авторов)

Данный структурный элемент для каждого автора включает:

- на русском языке – его фамилию и инициалы, после которых указывается сноска в виде цифры, набранной верхним индексом (надстрочным), которая ссылается на указание места работы автора. У фамилии автора, который будет контактировать с редакцией, также верхним индексом (после цифры) указывается символ «*»;

- на английском языке – его фамилию, имя и отчество в формате «Имя, инициал отчества, фамилия» (Ivan I. Ivanov). Фамилию на английском языке необходимо указывать в соответствии с заграничным паспортом или так, как она была указана в ранее опубликованных статьях. Если автор не имеет заграничного

паспорта и/или публикаций, для транслитерации фамилии и имени необходимо использовать стандарт BSI.

Оформление: Текст ФИО набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, межстрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «полужирный». ФИО разделяются запятой, точка в конце не ставится.

Пример:

Иванова А.А.¹, Петров В.В.^{2*}

Anna A. Ivanova, Victor V. Petrov

3) Место работы автора (авторов)

Место работы авторов приводится на русском языке, перед указанием места набирается верхним индексом (надстрочным) соответствующая цифра сноски, указывающая на имя автора.

Оформление: Текст места работы набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, межстрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный». Каждое место работы – с новой строки, точки в конце не ставятся.

Пример:

¹Московский государственный университет, Российская Федерация, Москва

²Санкт-Петербургский институт теплоэнергетики, Российская Федерация, Санкт-Петербург

4) Адрес электронной почты автора, который будет вести переписку с редакцией

Оформление: Текст адреса набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, межстрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный», все символы – строчные. Перед адресом набирается символ сноски «*». Точка в конце не ставится.

Пример:

*petrov_vv@aaa.ru

5) Резюме статьи

Данный структурный элемент включает структурированную аннотацию статьи объемом не менее 350 слов и не более 400 слов. Резюме представляется на русском и английском языках. Резюме должно содержать (желательно в явной форме) следующие разделы: Цель; Методы; Результаты; Выводы (на англ. яз.: Objective, Methods, Results, Conclusion). В резюме статьи не следует включать впервые введенные термины, аббревиатуры (за исключением общеизвестных), ссылки на литературу.

Оформление: Текст резюме набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный», кроме слов «**Резюме.**», «**Цель.**», «**Методы.**», «**Выводы.**» («**Objective.**», «**Methods.**», «**Results.**», «**Conclusion.**»), которые (вместе с точкой) должны иметь начертание шрифта «полужирный». Текст резюме на отдельные абзацы не разделяется (набирается в один абзац).

Пример (на рус. яз.):

Резюме. Цель. Предложить подход ... с учетом современных методик. **Методы.** В статье применяются методы математического анализа, ..., теории вероятностей. **Результаты.** С использованием предложенного метода получено... **Заключение.** Предлагаемый в статье подход позволяет...

6) Ключевые слова

Указывается 5-7 слов по теме статьи. Желательно, чтобы ключевые слова дополняли резюме (аннотацию) и название статьи. Ключевые слова указываются на русском и английском языках.

Оформление: Текст набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный», кроме слов «**Ключевые слова:**» («**Keywords:**») которые (вместе с двоеточием) должны иметь начертание «полужирный». Текст на отдельные абзацы не разделяется (набирается в один абзац). В конце ставится точка.

Пример (на рус. яз.):

Ключевые слова: надежность, функциональная безопасность, технические системы, управление рисками, производственная эффективность.

7) Текст статьи

Рекомендуется структурировать текст статьи в виде следующих разделов: Введение, Обзор источников, Методы, Результаты, Обсуждение, Заключение (или выводы). Рисунки и таблицы включаются в текст статьи (положение рисунков должно быть «в тексте», а не «за текстом» или «перед текстом»; без «обтекания текстом»).

Оформление:

Заголовки разделов набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, с абзацным отступом слева 1,25 см. Начертание шрифта «полужирный». Заголовки разделов (кроме введения и заключения (выводов)) могут иметь нумерацию арабскими цифрами с точкой после номера раздела. Номер с точкой отделяются от заголовка неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar).

Текст разделов набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, с абзацным отступом слева 1,25 см. Начертание шрифта «обычный» Текст разде-

лов разделяется на отдельные абзацы. Абзацный отступ не применяется для абзаца, следующего за формулой и содержащего пояснения к формуле, например: где n – количество изделий.

Пример:

1. Состояние вопроса повышения надежности электронных компонентов

Проведенный анализ отечественной и зарубежной литературы по теме исследования показал, что...

Рисунки (фотографии, скриншоты) должны быть хорошего качества, пригодные для печати. Разрешение рисунка – не хуже 300 dpi. Если рисунок представляет собой схему, диаграмму, чертеж и т.п., то желательно вставлять такой рисунок в текст в редактируемом формате (MS Visio). Все рисунки должны иметь подрисовочные подписи. Рисунки нумеруются арабскими цифрами, по порядку следования в тексте. Если рисунок в тексте один, то он не нумеруется. Отсылки на рисунки оформляются следующим образом: «На рис. 3 указано, что ...» или «Указано, что ... (см. рис. 3)». Сокращение «рис.» и номер рисунка (если он есть) всегда разделяются неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar). Подрисовочная подпись включает порядковый номер рисунка и его название. Располагается на следующей строке после рисунка и выравнивается по центру:

Рис. 2. Описание жизненно важных процессов

Точка после подрисовочной подписи не ставится. При выравнивании по центру абзацный отступ всегда должен отсутствовать! Все обозначения, приведенные на рисунках, необходимо пояснять в основном или подрисовочном тексте. Недопустимы отличия в обозначениях на рисунках и в тексте (включая различие прямых/наклонных символов). При проблемах с версткой рисунков, вставленных в текст, авторы должны по запросу редакции предоставить данные рисунки в графическом формате, в виде файлов с расширениями *.tiff, *.png, *.gif, *.jpg, *.eps.

Таблицы должны быть хорошего качества, пригодные для печати. Таблицы должны быть пригодны для редактирования (а не отсканированные или в виде рисунков). Все таблицы должны иметь заголовки. Таблицы нумеруются арабскими цифрами, по порядку следования в тексте. Если таблица в тексте одна, то она не нумеруется. Отсылки на таблицы оформляются следующим образом: «В табл. 3 указано, что ...» или «Указано, что ... (см. табл. 3)». Сокращение «табл.» и номер таблицы (если он есть) всегда разделяются неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar). Заголовок таблицы включает порядковый номер таблицы и ее название. Располагается на строке, предшествующей таблице и выравнивается по центру:

Табл. 2. Описание жизненно важных процессов

Точка после заголовка таблицы не ставится. При выравнивании по центру абзацный отступ всегда должен отсутствовать! Все обозначения (символы), приведен-

ные в таблицах, необходимо пояснять в основном тексте. Недопустимы отличия в обозначениях в таблице и в тексте (включая различие прямых/наклонных символов).

Математические обозначения в тексте набираются заглавными и строчными буквами латинского, греческого и русского алфавитов. Латинские символы всегда набираются наклонным шрифтом (курсивом), кроме обозначений функций, таких как \sin , \cos , \max , \min и т.п., которые набираются прямым шрифтом. Греческие и русские символы всегда набираются прямым шрифтом. Размер шрифта основного текста и математических обозначений (включая формулы) должен быть одинаков; верхние и нижние индексы масштабируются в MS Word автоматически.

Формулы могут быть включены непосредственно в текст, например:

Пусть $y = a \cdot x + b$, тогда...

либо набираться в отдельной строке, с выравниванием по центру, например:

$$y = a \cdot x + b.$$

При наборе формул как в тексте, так и в отдельной строке, знаки препинания должны ставиться по обычным правилам – точка, если формулой заканчивается предложение; запятая (или отсутствие знака препинания), если предложение после формулы продолжается. Для разделения формулы и текста рекомендуется для строки с формулой устанавливать вертикальные отступы (6 пт перед, 6 пт после). Если в тексте статьи делается отсылка на формулу, то такая формула обязательно набирается отдельной строкой, по правому краю которой указывается номер формулы в круглых скобках, например:

$$y = a \cdot x + b. \quad (1)$$

Если формула набирается в отдельной строке и имеет номер, то данная строка выравнивается по правому краю, а формула и номер разделяются знаком табуляции; позиция табуляции (в см) выбирается таким образом, чтобы формула располагалась примерно по центру. Формулы, на которые в тексте делаются отсылки, нумеруются арабскими цифрами, по порядку следования в тексте.

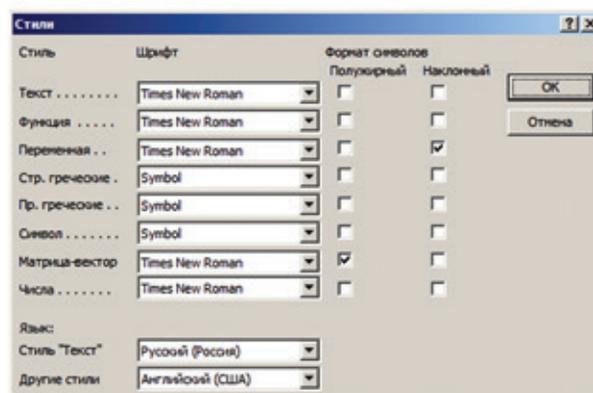
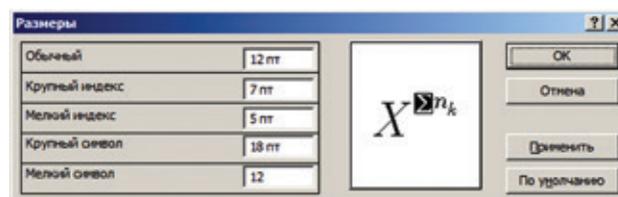
Простые формулы следует набирать без применения формульного редактора (использовать в MS Word русские и латинские буквы, а также меню «Вставка» + «Символ», если требуются греческие буквы и математические операторы), с соблюдением требуемого наклона для латинских символов, например:

$$\Omega = a + b \cdot \theta.$$

Если формула набирается без применения редактора формул, то между буквами и знаками «+», «-», «=» должны быть набраны неразрывные пробелы (Ctrl+Shift+Spacebar).

Сложные формулы набираются с применением редактора формул. Для отсутствия проблем с редак-

рованием формул и их версткой настоятельно рекомендуется использовать редакторы Microsoft Equation 3.0 или MathType 6.x. Для обеспечения корректного ввода формул (размер символов, их наклон и т.д.) рекомендуемые настройки редактора приведены на рисунках ниже.



При наборе формул в редакторе формул, если требуются скобки, то следует использовать скобки из формульного редактора, а не набирать их на клавиатуре (для корректной высоты скобок в зависимости от содержимого формулы), например (Equation 3.0):

$$Z = \frac{a \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i + \sum_{j=1}^m y_j \right)}{n + m}. \quad (2)$$

Сноски в тексте нумеруются арабскими цифрами, размещаются постранично. В сносках могут быть размещены: ссылки на анонимные источники в сети Интернет, ссылки на учебники, учебные пособия, ГОСТы, статистические отчеты, статьи в общественно-политических газетах и журналах, авторефераты, диссертации (если нет возможности процитировать статьи, опубликованные по результатам диссертационного исследования), комментарии автора.

Отсылка на библиографический источник указывается в тексте статьи в квадратных скобках, а источники приводятся в библиографическом списке в порядке их упоминания в тексте (затекстовые ссылки). Страница указывается внутри скобок, через запятую и пробел после номера источника: [6, с. 8]

8) Благодарности

В этом разделе указываются все источники финансирования исследования, а также благодарности людям, которые участвовали в работе над статьей, но не

являются ее авторами. Участие в работе над статьей подразумевает: рекомендации по совершенствованию исследования, предоставление пространства для исследования, ведомственный контроль, получение финансовой поддержки, одиночные виды анализа, предоставление реагентов/пациентов/животных/прочих материалов для исследования.

Оформление:

Сведения набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный».

9) Библиографический список

В библиографический список включаются только рецензируемые источники (статьи из научных журналов и монографии), упоминающиеся в тексте статьи. Нежелательно включать в библиографический список авторефераты, диссертации, учебники, учебные пособия, ГОСТы, информацию с сайтов, статистические отчеты, статьи в общественно-политических газетах, на сайтах и в блогах. Если необходимо сослаться на такую информацию, следует поместить информацию об источнике в сноску.

При описании источника следует указывать его DOI, если удастся его найти (для зарубежных источников удастся это сделать в 95% случаев).

Ссылки на принятые к публикации, но еще не опубликованные статьи должны быть помечены словами «в печати»; авторы должны получить письменное разрешение для ссылки на такие документы и подтверждение того, что они приняты к печати. Информация из неопубликованных источников должна быть отмечена словами «неопубликованные данные/документы», авторы также должны получить письменное подтверждение на использование таких материалов.

В ссылках на статьи из журналов должны быть обязательно указаны год выхода публикации, том и номер журнала, номера страниц.

В описании каждого источника должны быть представлены все авторы.

Ссылки должны быть верифицированы, выходные данные проверены на официальном сайте журналов и/или издательств.

Оформление:

Оформление ссылок (в русскоязычной версии журнала) должно выполняться по ГОСТ Р 7.0.5-2008. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления.

Библиографические ссылки набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, с абзацным отступом слева 1,25 см. Начертание шрифта «обычный» (см. примеры оформления в ГОСТ Р 7.0.5). Каждая

запись имеет нумерацию арабскими цифрами с точкой после номера раздела. Номер с точкой отделяются от записи неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar).

10) Сведения об авторах

Фамилия, имя, отчество полностью (на русском и английском языках); полный почтовый адрес (включая индекс, город и страну); полное наименование места работы, занимаемая должность; ученая степень, ученое звание, почетные звания; членство в общественных союзах, организациях, ассоциациях и т.д.; официальное англоязычное название учреждения (для версии на английском языке); адрес электронной почты; перечень и номера журналов, в которых ранее публиковались статьи автора; фото авторов для публикации в журнале.

Оформление:

Сведения набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный».

11) Вклад авторов в статью

Следует указать подробно, каким из авторов что сделано в статье. Например: Автором А. выполнен анализ литературы по теме исследования, автором Б. разработана модель объекта в реальных условиях эксплуатации, выполнен расчет примера и т.д. Даже если у статьи один автор, то требуется указание его вклада.

Оформление:

Сведения набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный».

12) Конфликт интересов

Конфликт интересов – это условия, при которых у людей возникают вступающие в конфликт или конкурирующие интересы, способные повлиять на принятие редакторского решения. Конфликты интересов могут быть потенциальными или осознанными, а также реально существующими. На объективность могут повлиять личные, политические, финансовые, научные или религиозные факторы.

Автор обязан уведомить редакцию о реальном или потенциальном конфликте интересов, включив информацию о конфликте интересов в статью.

Если конфликта интересов нет, автор должен также сообщить об этом. Пример формулировки: «Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов».

Оформление:

Текст набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный».

ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ ПРИ УЧАСТИИ И ПОДДЕРЖКЕ

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



АО «НИИАС» – ведущее предприятие ОАО «РЖД» в области создания комплексов и систем обеспечения безопасности движения, управления движением, геоинформационного обеспечения, мониторинга состояния подвижного состава и инфраструктуры железных дорог



Цели:

- эффективность
- безопасность
- надежность перевозок



Основные направления деятельности

- Интеллектуальные системы управления
- Технологии управления перевозками и транспортного обслуживания
- Системы автоматики и телемеханики
- Центры автоматизированного управления
- Информационные системы
- Геоинформационные системы и спутниковые технологии
- Системы транспортной безопасности
- Системы управления инфраструктурой
- Системы управления топливно-энергетическими ресурсами
- Испытания, сертификация и экспертиза
- Информационная безопасность
- Нормативно-правовое обеспечение



www.vniias.ru