

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:

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

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, 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)

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

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

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, заведующий кафедрой «Автоматизированные системы управления» Российского университета транспорта (МИИТ) (Москва, РФ)

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

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

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

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

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)

УЧРЕДИТЕЛЬ ЖУРНАЛА:
ООО «Журнал «Надежность»

Зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Регистрационное свидетельство ПИ № 77-9782 от 11 сентября 2001 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 14.12.2021
Объем , Тираж 500 экз, Заказ №
Формат 60х90/8, Бумага глянец

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

Статьи рецензируются.
Статьи опубликованы в авторской редакции.

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

СОДЕРЖАНИЕ

Структурная надежность. Теория и практика

Тюрин М.А., Бочаров М.Е., Воронцов В.А., Мельникова А.В. Повышение надежности лёгких проветриваемых фундаментов при вибрационной нагрузке на мерзлых грунтах	3
Бабков Ю.В., Белова Е.Е., Потапов М.И. К вопросу классификации отказов железнодорожного тягового подвижного состава	12
Зеленцов Б.П. Использование показательного распределения в математических моделях надежности	20
Волохов Г.М., Оганьян Э.С., Гаджиметов Г.И., Князев Д.А., Чунин В.В., Тимаков М.В. Оценка прочности и ресурса для установления назначенного срока службы колесной пары скоростного вагона-платформы	26

Функциональная безопасность и живучесть. Теория и практика

Шубинский И.Б., Шебе Х., Розенберг Е.Н. К оценке безопасности системы автоведения поездов	31
Кулагин М.А., Сидоренко В.Г. Поддержка принятия решения по профилактике нарушений безопасности в работе	38
Конюхов А.М., Хлебнов А.В., Тиманов В.А. Способ проверки релейной защиты и автоматики при каскадном воздействии для повышения надежности электроснабжения и устойчивости электроэнергетических систем	47

Управление рисками. Теория и практика

Горелик А.В., Малых А.Н., Орлов А.В. Оценка влияния готовности объектов транспортной инфраструктуры ОАО «РЖД» на риски потерь для перевозочного процесса	53
Гнеденко – Форум	57

Повышение надежности легких проветриваемых фундаментов при вибрационной нагрузке на мерзлых грунтах

Михаил А. Тюрин^{1*}, Михаил Е. Бочаров², Михаил А. Воронцов², Анна В. Мельникова²

¹ООО «Газпром Проектирование», Саратов, Российская Федерация, ²ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Москва, Российская Федерация

*mihail0710@yandex.ru



Михаил А. Тюрин



Михаил Е. Бочаров



Михаил А.
Воронцов



Анна В. Мельникова

Резюме. Цель. Современные фундаменты под технологическое оборудование с динамическими нагрузками часто оказываются переразмеренными с сильно завышенными показателями жесткости, массы и материалоемкости. В связи с этим сокращение затрат и сроков строительства объектов газотранспортной системы, в особенности на вечномерзлых грунтах, является актуальным для ПАО «Газпром». Одним из основных направлений решения указанной задачи является размещение газоперекачивающего оборудования на легких проветриваемых опорных конструкциях. Недостатком таких конструкций является низкая вибрационная устойчивость. Предложен способ [1] для повышения вибрационной устойчивости фундамента при вибрационной нагрузке. Целью моделирования является повышение надежности легких проветриваемых фундаментов, за счет изучения особенностей виброперемещений фундамента с присоединенными железобетонными плитами в зависимости от температурного состояния мерзлых грунтов, параметров присоединяемых плит и соединительных элементов. **Методы.** Определение виброперемещений фундамента с присоединенным устройством выполнялось с использованием метода конечных элементов и усовершенствованной расчетной модели системы фундамент-ГПА-грунтовое основание. **Результаты.** В результате проведения вычислительных экспериментов определены виброперемещения фундамента в холодное и теплое время года для случаев присоединения железобетонных плит к фундаменту: симметричного и несимметричного; на разном удалении; через соединительные элементы с разными параметрами жесткости; с дополнительными утяжелителями; вмороженных в грунт. Сделаны выводы по результатам моделирования виброперемещений фундамента с присоединенным устройством в холодное и теплое время года. **Заключение.** Представленные результаты вычислительных экспериментов по повышению вибрационной устойчивости легких фундаментов за счет применения способа [1] показывают достаточно хорошие показатели уменьшения виброперемещений фундамента. Так, при симметричном присоединении четырех железобетонных плит в летний период эксплуатации уменьшение виброперемещений составляет 42,4 %, а увеличение жесткости соединителей, присоединение дополнительных грузов и вмораживание в грунт железобетонных плит позволяют уменьшить виброперемещения фундамента до 2,5 раз. Вместе с тем необходимо отметить, что для практического применения полученных результатов, при разработке проектной документации и строительстве фундаментов необходимо проведение НИОКР, включающих верификацию и сравнение полученных результатов численного моделирования с натурным экспериментом.

Ключевые слова: снижение виброперемещений, фундамент ГПА, динамическая нагрузка, соединительный элемент, утяжеление.

Для цитирования: Тюрин М.А., Бочаров М.Е., Воронцов М.А., Мельникова А.В. Повышение надежности легких проветриваемых фундаментов при вибрационной нагрузке на мерзлых грунтах // Надежность. 2021. №4. С 3-11. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-4-3-11>

Поступила 24.03.2021 г. / После доработки 12.11.2021 г. / К печати 14.12.2021 г.

1. Введение

Современные фундаменты под технологическое оборудование с динамическими нагрузками часто оказываются переразмеренными с сильно завышенными показателями жесткости, массы и материалоемкости. В связи с этим сокращение затрат и сроков строительства объектов газотранспортной системы, в особенности на вечномерзлых грунтах, является актуальным для ПАО «Газпром». Одним из основных направлений решения является размещение газоперекачивающего оборудования на легких проветриваемых опорных конструкциях. Недостатком таких конструкций является низкая виброустойчивость, которая компенсируется устройством массивной железобетонной плиты сверху фундамента, увеличением количества и глубины погружения свай, что приводит к увеличению сроков строительства и материалоемкости фундамента. Повышение вибрационной устойчивости легких опорных конструкций фундамента возможно на основе «Способа повышения динамической жесткости фундамента при вибрационной нагрузке и устройстве для его реализации» [1] (далее – Способ).

2. Способ

Способ предусматривает присоединение к фундаменту дополнительной конструкции через соединительные элементы для передачи динамических нагрузок от фундамента на грунтовое основание, за счет этого уменьшаются виброперемещения фундамента, это снижает стоимость вибрационной защиты фундамента при минимальных грунтовых работах. В качестве дополнительной конструкции в статье рассмотрено присоединение железобетонных плит (далее – ЖБплиты), для передачи динамических нагрузок от фундамента на грунтовое основание (рис. 1). За счет этого виброперемещения фундамента уменьшаются, а стоимость вибрационной защиты фундамента при минимальных грунтовых работах снижается. При этом размещение

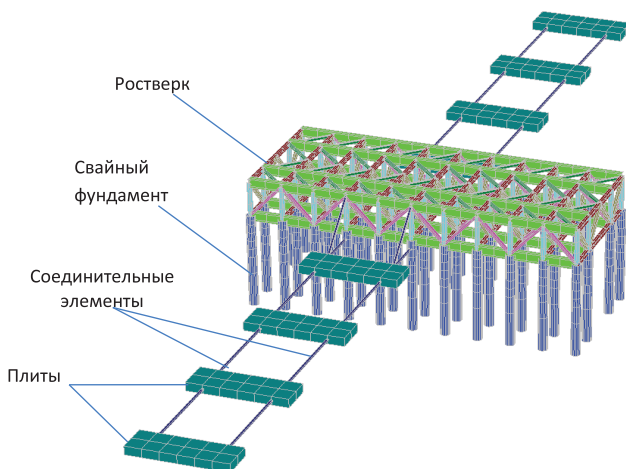


Рис. 1. Схема присоединения к фундаменту железобетонных плит

ЖБплит на поверхности грунтового основания без заглубления в грунт минимизирует проблемы растепления мерзлых грунтов на этапе эксплуатации.

Для повышения эффекта от применения Способа предусматривается: утяжеление присоединяемых ЖБплит и намораживание грунта, а также подбор параметров (жесткости, геометрических размеров, расположения в пространстве) соединительных элементов и присоединяемых ЖБплит для передачи упругих колебательных волн в грунтовой массив.

Разработан ряд расчетных моделей по определению виброперемещений фундамента газоперекачивающего агрегата (далее – ГПА) «Урал» мощностью 25 МВт от воздействия динамической нагрузки на примере грунтового основания с мерзлотой сливающегося типа. Мерзлота сливающегося типа характеризуется тем, что оттаивающий за лето слой полностью промерзает в течение холодного сезона, образуя при этом единый мерзлый массив. Виброперемещения фундамента определялись в усовершенствованной расчетной модели грунтового основания [2, 3]. Данные для определения динамической нагрузки от вращения роторов ГПА-25 «Урал» приведены в табл. 1. Эксцентриситет роторов для демонстрации результатов моделирования принят условно по данным опытных наблюдений $e = 1,5$ мкм или 0,0015 мм, этот параметр зависит от точности изготовления ротора.

Табл. 1. Данные для определения динамической нагрузки

Наименование движущихся деталей	Масса, кг	Частота вращения		Центробежная сила, Н
		n , об./мин	ω , рад./сек	
Ротор силовой турбины (СТ), m_3	670	5250	550	314
		5000	523	284
		3500	366	139
Ротор турбины низкого давления (ТНД), m_1	753	4600	481	270
		4300	450	236
		3200	335	131
Ротор компрессора высокого давления (КВД), m_2	410	12000	1256	1003
		11670	1221	947
		10150	1062	717
Трансмиссия ГТУ, m_4	160	5250	550	75
		5000	523	68
		3500	366	33
Ротор нагнетатель, m_5	1350	5250	550	633
		5000	523	572
		3500	366	280

Одновременное воздействие на фундамент от вращающихся с разными скоростями роторов представляет собой полигармоническое силовое воздействие [4], (рис. 2). Суммарная амплитуда колебаний определяется сложением составляющих виброперемещения от каждого источника по отдельности.

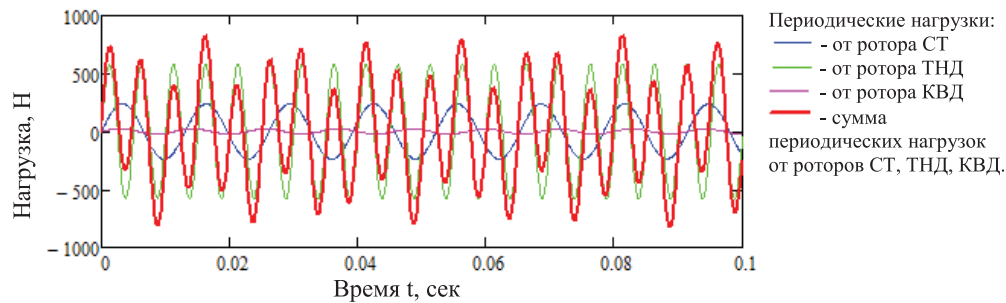


Рис. 2. Графики периодических нагрузок, действующих на опору двигателя

$$\sum_{i=1}^n y_i = A_1 \sin(\omega_1 t + \delta_1) + A_2 \sin(\omega_2 t + \delta_2) + A_3 \sin(\omega_3 t + \delta_3) + A_4 \sin(\omega_4 t + \delta_4) + A_5 \sin(\omega_5 t + \delta_5) \quad (1)$$

где: $A_1, A_2, \dots, A_5$ – амплитуды колебаний от воздействия периодических нагрузок $P_1, P_2, \dots, P_5$; $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_5$ – фазовые углы; $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_5$ – угловые частоты воздействия источников периодических нагрузок.

Для получения результатов вычислительного эксперимента достаточно определить одну из составляющих виброперемещения фундамента, например, от воздействия периодической нагрузки: $P_3 \cdot \sin(\omega_3 \cdot t)$, где $P_3 = m_3 \cdot e_3 \cdot \omega_3^2$ – динамическая нагрузка от вращения ротора силовой турбины, Н [5], ω_3 – круговая частота вращения роторов, 1/с, t – время, с.

Виброперемещения определялись для наиболее тепло-го и холодного времени года соответственно для случаев:

I. Симметричного и несимметричного присоединения ЖБплит;

II. Присоединения ЖБплиты, удаленной от центральной оси фундамента на расстояние от 5,25 м до 23,25 м;

III. Присоединения ЖБплиты через соединительные элементы с коэффициентами жесткости K от $175560 \cdot 10^3$ до $2251200 \cdot 10^3$ ($H \cdot m^2$)/ m^2 , где $K = E \cdot S$, E – модуль упругости материала соединителя, Па, S – площадь поперечного сечения соединителя, m^2 ;

IV. Размещения утяжелителей на поверхности ЖБплиты;

V. Смерзания грунта с ЖБплитой.

Конструкция ростверка и свайного поля под ГПА принята такая же, как на компрессорных станциях № 2 «Олекминская» и № 6 «Сковородинская» магистрального газопровода «Сила Сибири». Фундамент состоит из стального надземного ростверка массой 77,6 т и свайного поля в количестве 44 свай из труб диаметром 426 мм с толщиной стенки 9 мм из стали марки 09Г2С, (глубина погружения свай – 12 м, масса одной свай – 1158 кг). Грунтовое основание до глубины 3-х метров представляет собой насыпной грунт в виде песка средней крупности. Ниже глубины 3-х метров залегают суглинки льдистые в твердомерзлом состоянии. В летний период верхний слой грунта оттаивает до глубины 2-х метров, в конце зимы грунтовое основание, включая верхний слой

насыпных грунтов, находится в твердомерзлом состоянии. Температура грунтов на глубине 12-ти метров от уровня планировки составляет минус 1,5°C. Распределение температур и модулей упругости мерзлых грунтов по глубине грунтового основания для наиболее тепло-го и холодного времени года приведено на рис. 3.

3. Симметричное и несимметричное присоединение устройства

Рассмотрим результаты моделирования с симметричным присоединением устройства [1] к фундаменту в летнее и зимнее время. На рис. 4 приведены результаты определения амплитуд колебаний фундамента от воздействия одной из составляющей суммарной периодической нагрузки $P_3 \cdot \sin(\omega_3 \cdot t)$.

Из графиков на рис. 4А и рис. 4Б видно, что симметричное присоединение 2-х ЖБплит в зимний период уменьшает максимальную амплитуду колебаний $A_{\max}$ на 17,2 %, при этом увеличение количества присоединяемых плит с

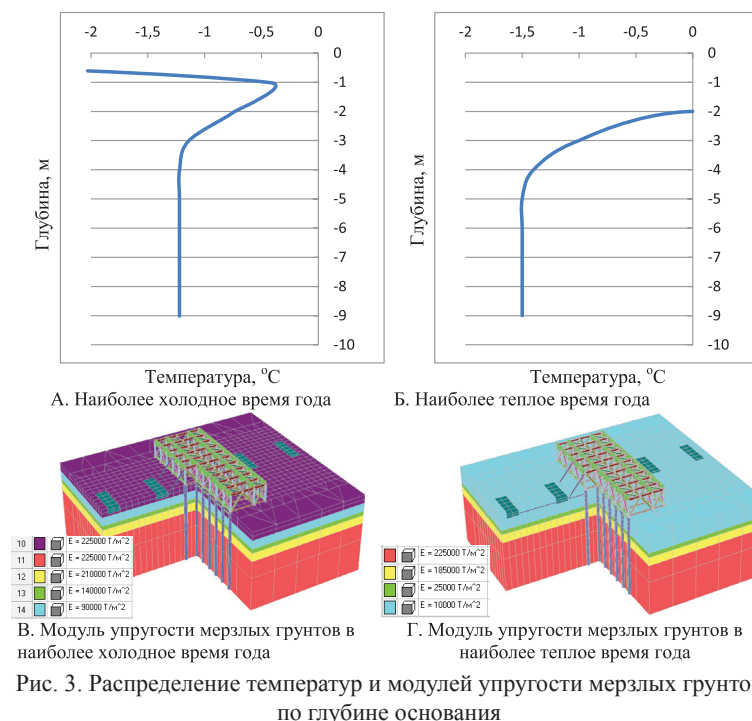
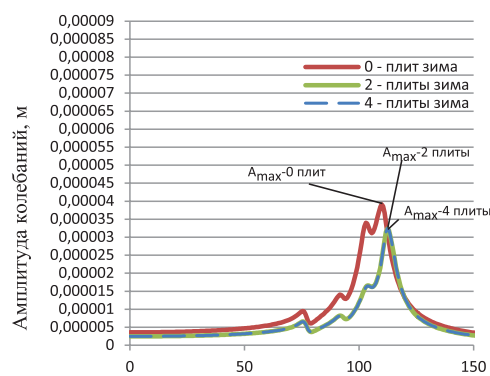
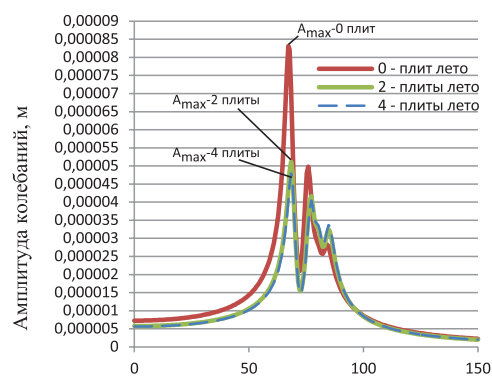


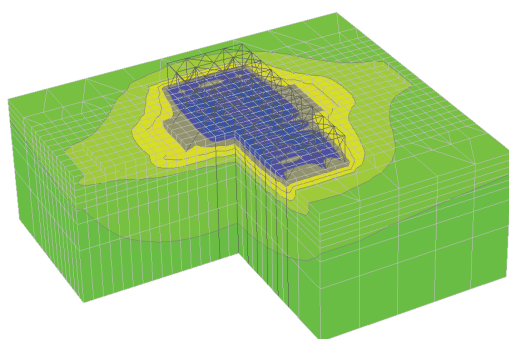
Рис. 3. Распределение температур и модулей упругости мерзлых грунтов по глубине основания



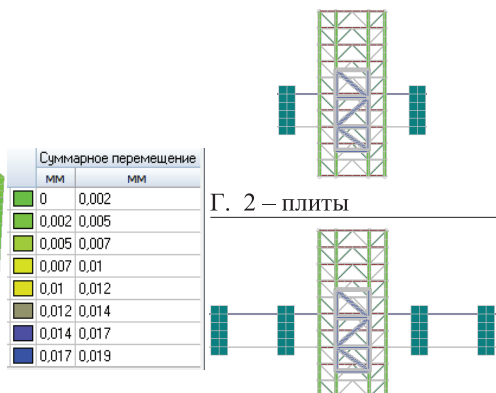
А. АЧХ фундаментов в зимнее время



Б. АЧХ фундаментов в летнее время



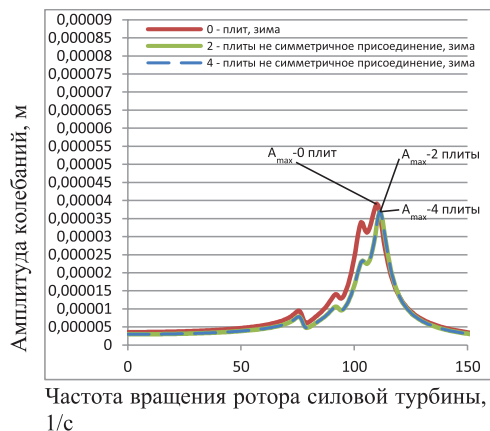
В. Виброперемещение частиц грунтового основания



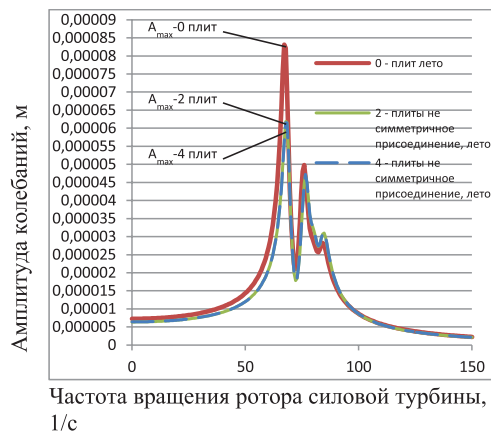
Г. 2 – плиты

Д. 4 – плиты

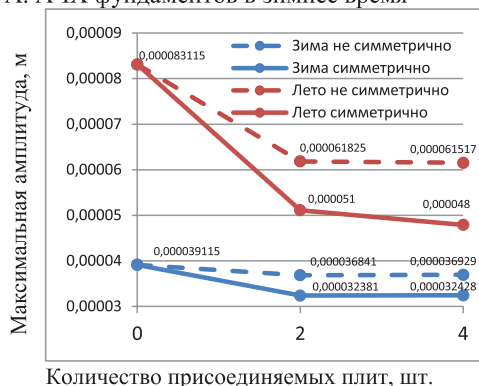
Рис. 4. Определение амплитуд колебаний фундамента с симметрично присоединенными ЖБплитами



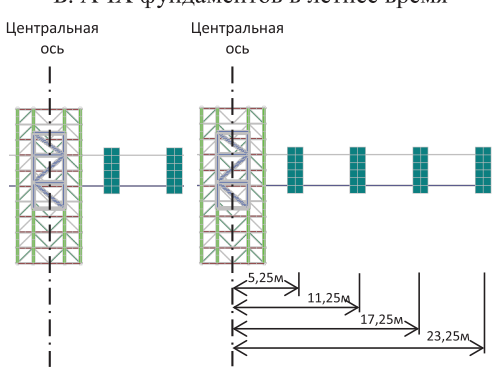
А. АЧХ фундаментов в зимнее время



Б. АЧХ фундаментов в летнее время

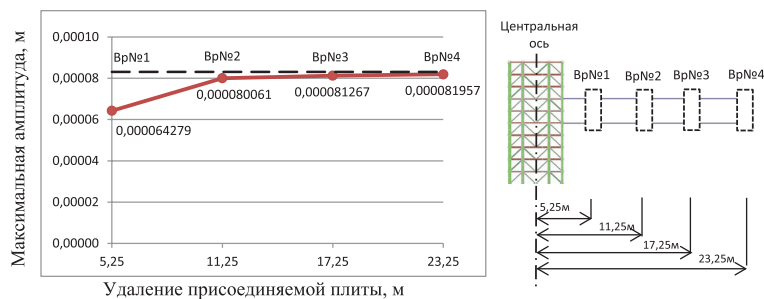


В. Сравнение A_{max}



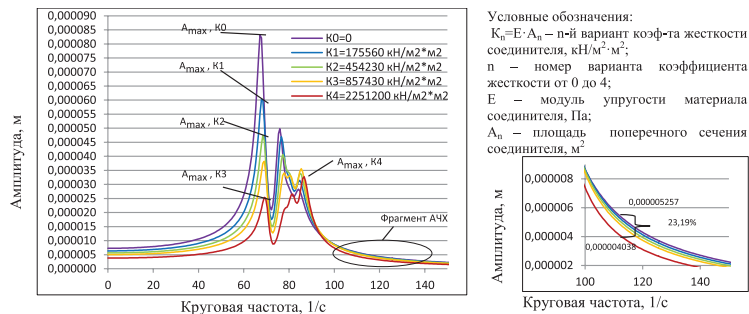
Г. 2 – ЖБплиты Д. 4 – ЖБплиты

Рис. 5. Сравнения АЧХ фундаментов с не симметрично присоединенными ЖБплитами

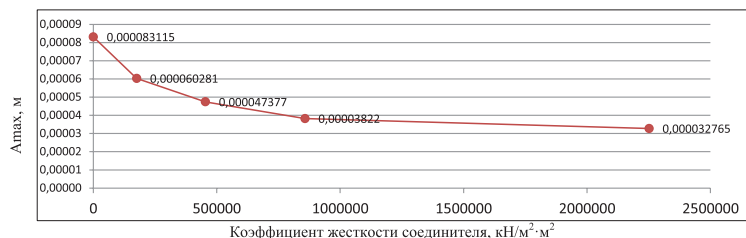


А. Кривая зависимости $A_{\max}$ от длины соединителя Б. Варианты присоединения

Рис. 6. Сравнение $A_{\max}$ для четырех вариантов присоединения, разно-удаленных ЖБплит



А. АЧХ для пяти вариантов жесткости соединителей Б. Фрагмент АЧХ в диапазоне от 100 до 150 1/с



В. Кривая зависимости $A_{\max}$ от коэффициента жесткости соединительных элементов



Г. Кривая зависимости $\lambda_{A_{\max}}$ от коэффициента жесткости соединительных элементов

Рис. 7. Зависимость АЧХ фундамента от коэффициента жесткости соединителей

2-х до 4-х практически не влияет на изменение $A_{\max}$. В то же время, присоединение 2-х и 4-х ЖБплит в летний период уменьшает $A_{\max}$ на 38,5 % и 42,4 % соответственно.

В виду плотного расположения технологического оборудования может быть целесообразным и несимметричное присоединение ЖБплит к фундаменту, например, только с одной стороны (рис. 5). В этом случае при одинаковом количестве присоединяемых ЖБплит по результатам моделирования наблюдается уменьшение виброперемещений в зимнее время на 5,8 %, в летнее время на 25,6 %.

По результатам моделирования увеличение количества несимметрично присоединяемых ЖБплит с 2-х до 4-х не влияет на изменение $A_{\max}$ как в летний так и в зимний период эксплуатации. Таким образом несимметрич-

ное присоединение более 2-х ЖБплит нецелесообразно (см. рис. 5В). Позитивный эффект от несимметричного применения ЖБплит меньше на 16,8...32,8 % по сравнению с симметричной схемой, но достоинством этой схемы является ее универсальность в применении, особенно при плотном расположении технологического оборудования вокруг фундамента ГПА.

4. Присоединение ЖБплит на разном удалении от центральной оси фундамента

Рассмотрим $A_{\max}$ для четырех вариантов присоединения одной ЖБплиты на расстоянии от центральной оси фундамента 5,25 м, 11,25 м, 17,25 м и 23,25 м (рис. 6). Присоединение ЖБплиты на расстоянии 5,25 м уменьшает $A_{\max}$ на 22,7 %, при этом присоединение такой же плиты на расстояниях 11,25 м, 17,25 м, 23,5 м уменьшает амплитуду колебаний соответственно на 3,7 %, 2,2 % и 1,4 %. Таким образом, при увеличении длины соединительного элемента в 4 раза происходит потеря эффекта уменьшения амплитуд колебаний в 16 раз.

Эффективность работы соединительного элемента с коэффициентом жесткости 452760 (Н·м²)/м² (из квадратной трубы 90 x 90 мм с толщиной стенки 7 мм) при расстояниях ЖБплиты от оси фундамента более 10 м и 20 м составляет менее 5 % и 2 % соответственно. Очевидно, что для повышения эффекта от присоединения ЖБплит целесообразно увеличивать жесткость соединителей.

5. Присоединение ЖБплит через соединительные элементы с разными коэффициентами жесткости

По результатам сравнения АЧХ фундаментов с симметрично присоединенными ЖБплитами с коэффициентами жесткости соединителей от 175560 кН/м²·м² до 2251200 кН/м²·м² построены кривые зависимости $A_{\max}$ и $\lambda_{A_{\max}}$ от жесткости соединителей на рис. 7В, Г, где: $\lambda_{A_{\max}}$ – соответствующая $A_{\max}$ частота собственных колебаний фундамента. При увеличении жесткости соединителей, начиная от нулевого значения и до 2251200 кН/м²·м², $A_{\max}$ уменьшается в 2,53 раза, при этом $\lambda_{A_{\max}}$ увеличивается на 28,97 %. В диапазоне частот от 100 до 150 1/с уменьшение амплитуд колебаний составляет более 23 % (см. рис. 7Б).

Таким образом, подход, связанный с увеличением жесткости соединительных элементов, хорошо применим для ГПА с круговой частотой воздействия динамических нагрузок более 100 1/с, например, для газотурбинных ГПА.

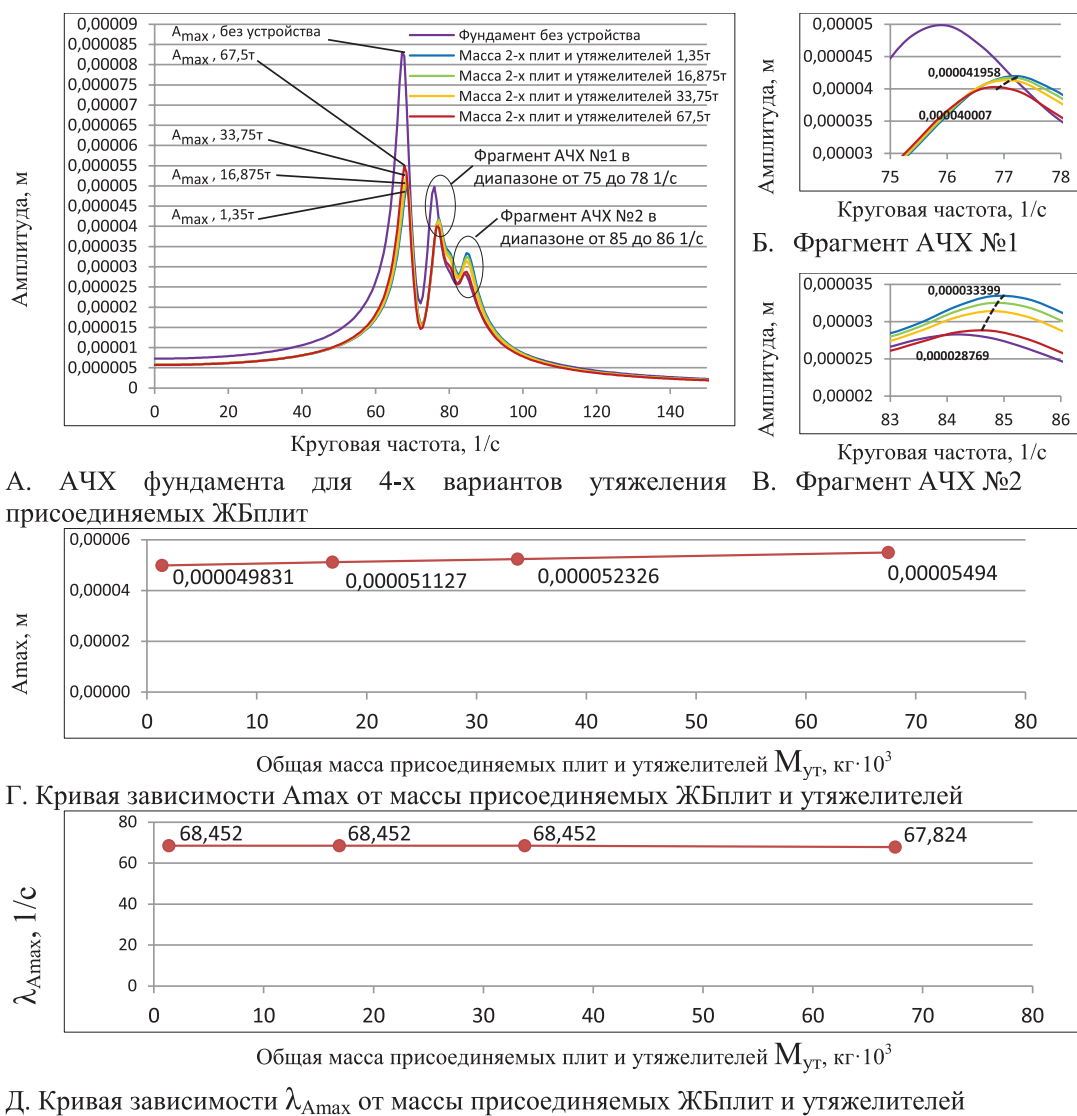


Рис. 8. Зависимость АЧХ фундамента от массы присоединяемых ЖБплит и утяжелителей

6. Размещение утяжелителей на поверхности ЖБплиты

По результатам анализа амплитудно-частотных характеристик увеличение общей массы $M_{ут}$ двух симметрично присоединяемых к фундаменту ЖБплит с утяжелителями не влияет на уменьшение A_{max} , а наоборот, в диапазоне частот от 67,5 до 68,45 1/с, при увеличении $M_{ут}$ с 1,35 т до 67,5 т увеличение A_{max} составляет 9,3 %, при этом $\lambda_{A_{max}}$ уменьшается на 0,93 %. В то же время в диапазоне частот от 76 до 78 1/с наблюдается уменьшение максимальной амплитуды колебаний на 3,73 % и соответствующей ей частоты на 0,819 %, аналогично в диапазоне частот от 83 до 86 1/с (см. рис. 8Б, В).

По результатам АЧХ увеличение массы присоединяемых ЖБплит в диапазоне частот до 70 1/с не позволяет уменьшить A_{max} , в то же время в диапазоне частот от 76 до 78 1/с увеличение массы ЖБплит с 1,35 до 67,5 т уменьшает A_{max} на 3,7 %, а для частот от 83 до 87 1/с уменьшение A_{max} составляет 16,1 %.

Увеличение массы присоединяемых ЖБплит достаточно эффективно работает для ГПА с круговой частотой вращения роторов более 83 1/с что соответствует примерно 800...850 оборотам в минуту. При этом для ГПА с частотой вращения роторов менее 800...850 оборотов в минуту наблюдается обратный эффект, связанный с увеличением амплитуды колебаний.

7. Смерзание грунта с ЖБплитой

Определены АЧХ фундамента с присоединенными ЖБплитами для вариантов смерзания грунтового основания с ЖБплитой до глубины 0,5 м, 1,0 м, 1,5 м, 2 м, 2,5 м (рис. 9). Смерзание поверхности ЖБплиты с грунтовым основанием обеспечивается за счет работы хладагентов, проходящих через специальные полости, размещенные внутри плиты [1]. Также смерзание может быть обеспечено системой горизонтальной термостабилизации грунтов [6].

По результатам сравнения АЧХ фундамента с присоединенными ЖБплитами для пяти вариантов смерзания и случая, когда смерзания нет, наблюдается уменьшение $\lambda_{A_{\max}}$ на 21,1 % и на 17,2 % при глубине смерзания грунта с ЖБплитой соответственно 0,5 м и 2,5 м, рис. 10В.

Необходимо отметить, что с одной стороны, увеличение объема смерзания грунта с ЖБплитой увеличивает присоединяемую массу мерзлого грунта, оказывая влияние на уменьшение частоты собственных колебаний фундамента, а с другой стороны, с увеличением объема смерзания увеличиваются жесткость системы фундамент-ЖБплита и частота собственных колебаний. При смерзании компонентов грунта с ЖБплитой на глубину 0,5 и 2,5 метров происходит увеличение $A_{\max}$ на 118,1 % и 46 % соответственно (см. рис. 10Б).

По результатам расчетного моделирования и численных экспериментов определены АЧХ фундамента для случаев: симметричного и несимметричного присоединения устройства, присоединение включающего разное количество ЖБплит на разных расстояниях с различными коэффициентами жесткости соединительных элементов, а также с размещением утяжелителей на поверхности ЖБплиты и с учетом глубины смерзания ЖБплиты и грунтового основания.

Необходимо отметить, что лучший эффект в виде уменьшения параметров $A_{\max}$ и $\lambda_{A_{\max}}$ при присоединении ЖБплит достигается при их симметричном присоединении к фундаменту (см. рис. 5Б).

Повысить эффект возможно за счет увеличения жесткости соединительных элементов (см. рис. 7В), или уменьшения расстояния присоединяемой ЖБплиты от фундамента, если это возможно из условий размещения

технологического оборудования (см. рис. 6А). В этом случае достижение желаемого результата возможно и при несимметричном расположении ЖБплит (см. рис. 5В, Г).

Увеличение массы присоединяемых ЖБплит за счет присоединения утяжелителей или намораживания грунта [1] также позволяет повысить эффект по уменьшению параметров $A_{\max}$ и $\lambda_{A_{\max}}$, но только в диапазоне частот выше 1000 оборотов в минуту, это можно применять для газотурбинных ГПА с минимальной рабочей частотой вращения роторов 3000...3500 об/мин. В то же время для механизмов с частотой вращения 1000 об/мин и менее применение данного подхода требует проведения дополнительных научных исследований.

8. Заключение

Рассмотренный в статье Способ отличается простотой и повышенной надежностью, так в качестве утяжелителей для ЖБплит возможно использовать бетонные блоки, строительные смеси, цементированный песок и т.д.

Результатами исследования выявлено, что при симметричном присоединении четырех железобетонных плит в летний период эксплуатации уменьшение виброперемещений составляет 42,4 %, а увеличение жесткости соединителей, присоединение дополнительных грузов и вмораживание в грунт железобетонных плит позволят уменьшить виброперемещения фундамента до 2,5 раз. Моделирование по определению надежности показало эффективность Способа в холодное и теплое время года:

- при симметричном и несимметрично присоединении ЖБплит;

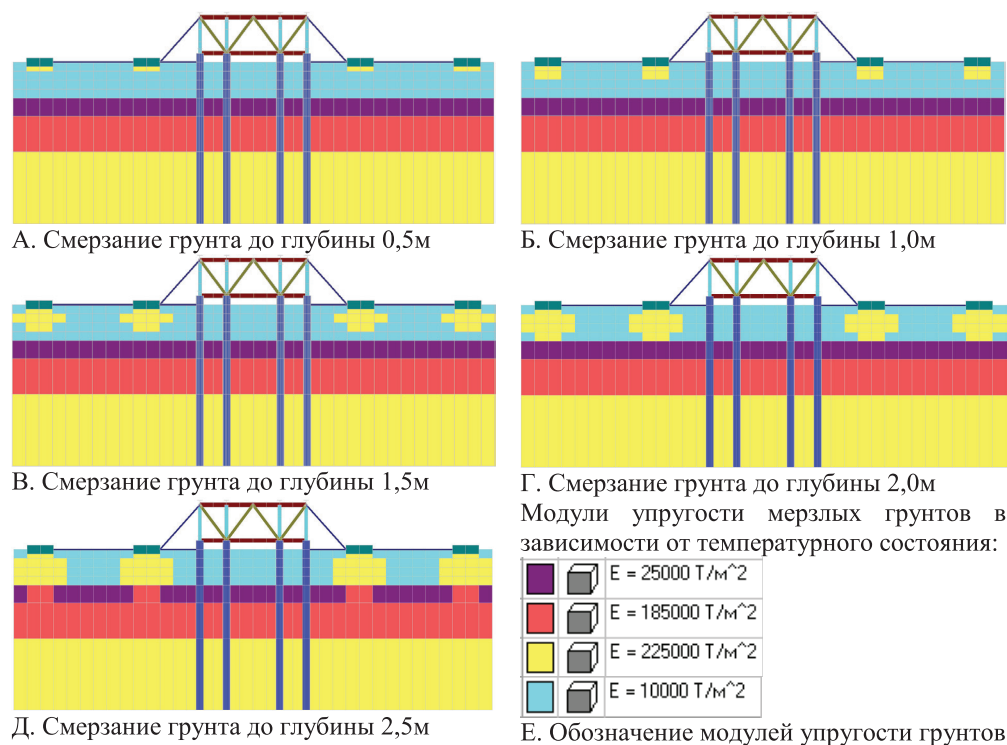
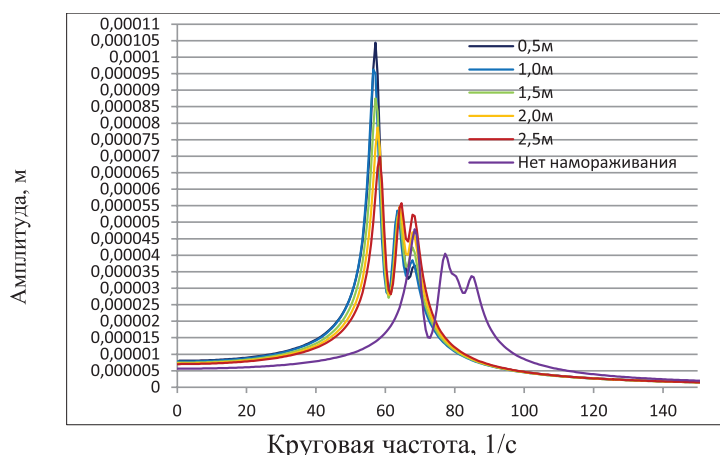


Рис. 9. Варианты глубины смерзания грунта с ЖБплитой



А. АЧХ для пяти вариантов глубины смерзания грунта под ЖБплитой

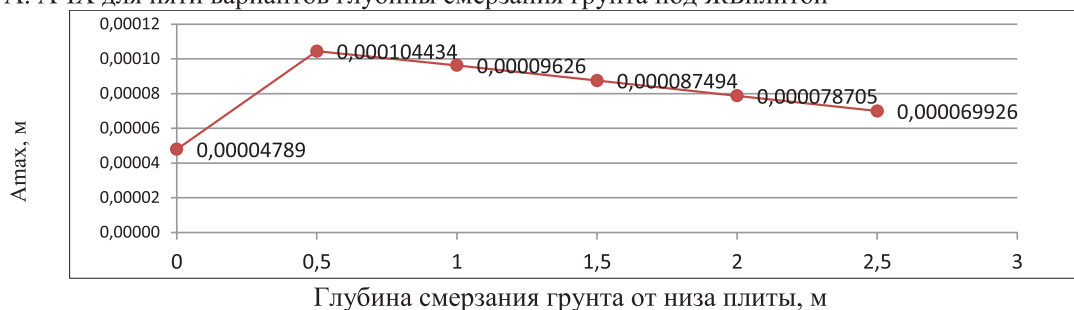
Б. Кривая зависимости A_{max} от глубины примерзания грунтаВ. Кривая зависимости $\lambda_{A_{max}}$ от глубины смерзания грунта

Рис. 10. Зависимость АЧХ фундамента от глубины смерзания грунта с ЖБплитой

- на разном удалении ЖБплит друг от друга и от фундамента;

- при использовании соединительных элементов с разными параметрами жесткости;

- с использованием дополнительных утяжелителей;

- при смерзании с грунтом.

Исследования в области повышения надежности фундаментов при вибрационной нагрузке проводятся не только в нашей стране, но и за рубежом [7, 8, 9, 10, 11].

В заключение необходимо отметить, что для практического применения Способа предстоят дополнительные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, т.к., приведенные результаты вычислительных экспериментов показывают достаточно хорошие показатели уменьшения виброперемещений фундамента. Вместе с тем необходимо отметить, что для практического применения полученных результатов при разработке проектной документации и строительстве фундаментов необходимо проведение НИОКР,

включающих верификацию и сравнение полученных результатов численного моделирования с натурным экспериментом.

Библиографический список

1. Тюрин М.А., Бочаров М.Е., Клейменов Е.А. Способ повышения динамической жесткости фундамента при вибрационной нагрузке и устройство для его реализации. Пат. №2687211 // Российская Федерация, МПК E02D 31/08. Заявитель и патентообладатель ООО «Газпром проектирование». – 2018137569; заявл. 2018.10.25; опубл. 2019.05.07.

2. Тюрин М.А., Воронцов М.А. Исследование динамических нагрузок на фундамент при работе газоперекачивающих агрегатов // Технологии нефти и газа. 2016. № 2. С. 45-50.

3. Тюрин М.А., Клейменов Е.А., Рябов В.А. и др. Математическое моделирование легких фундаментов ГПА с учетом грунтовых условий Ямала и Восточной

Сибири // Научный журнал российского газового общества. 2016. № 2. С. 27-32.

4. Тюрин М.А., Бочаров М.Е. Исследование воздействия динамических нагрузок на легкие фундаменты газоперекачивающих агрегатов в сложных геологических условиях // Сборник статей заочной научной конференции молодых ученых и специалистов предприятий газовой промышленности и учебных заведений Саратовской области «Новые технологии в газовой промышленности». Саратов, 21 декабря 2016. С. 76-79.

5. Тюрин М.А., Козлов С.И. Применение легких проветриваемых фундаментов под ГПА на компрессорных станциях в сложных геологических условиях Ямальской группы месторождений // Территория Нефтегаз. 2013. № 10. С. 62-70.

6. Попов А.П., Милованов В.И., Рябов В.А. и др. Совершенствование способа управления криогенным ресурсом основания при проектировании нулевых циклов зданий и сооружений // Геотехника. Международный журнал. 2010. № 6. С. 4-22.

7. Ataulla Attar, Shahbaz Dandin. Economical Method of Reducing vibration on Machine Foundation // Journal of Mechanical and Civil Engineering. 2015. P. 89-97.

8. H. van Koten. Vibrations of machine foundations and surrounding soil // Delft University of Technology, Delft, the Netherlands. 2012. No. 1. P 29-54.

9. Rajib Ul Alam Uzzal. Dynamic response of a beam subjected to moving load and moving mass supported by Pasternak foundation // Journal of Shock and Vibration, Concordia Center for Advanced Vehicle Engineering, Mechanical and Industrial Engineering Department, Concordia University, Montreal, Canada. 2012. P. 205-220.

10. Galal A. Hassaan. Optimal Design of Machinery Shallow Foundations with Silt Soils // International Journal of Mechanical Engineering. 2014. Issue 3. P. 11-24.

11. George Gazetas. Analysis of machine foundation vibrations: state of the art // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. Polytechnic Institute, Troy, New York, USA. 1983. Vol. 2. No. 1. P. 2-42.

Сведения об авторах

Тюрин Михаил Александрович – кандидат технических наук, руководитель группы прочностных расчетов

отдела строительного проектирования Саратовского филиала ООО «Газпром проектирование», улица Сакко и Ванцетти, 4, Саратов, Российская Федерация, 410012, e-mail: mihail0710@yandex.ru.

Бочаров Михаил Евгеньевич – кандидат технических наук, начальник отдела стандартизации цифровых процессов ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Московская область, г.о. Ленинский, п. Развилка, пр-д Проектируемый № 5537, здание 15, строение 1, Российская Федерация, 142717, e-mail: bocharov.me@yandex.ru.

Воронцов Михаил Александрович – кандидат технических наук, начальник лаборатории промышленных компрессорных и турбохолодильных систем ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Московская область, г.о. Ленинский, п. Развилка, пр-д Проектируемый № 5537, здание 15, строение 1, Российская Федерация, 142717, e-mail: m_vorontsov@list.ru.

Мельникова Анна Валерьевна – кандидат технических наук, главный специалист лаборатории предиктивного моделирования поврежденности линейно-протяженных и площадных объектов ЕСГ Корпоративного научно-технического центра коррозионного мониторинга и защиты от коррозии ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Московская область, г.о. Ленинский, п. Развилка, пр-д Проектируемый № 5537, здание 15, строение 1, Российская Федерация, 142717, e-mail: A_Melnikova@vniigaz.gazprom.ru.

Вклад авторов в статью

Тюрин М. А. составлена основная идея исследования, осуществлена постановка задачи и разработан подход к ее решению.

Бочаров М. Е. выполнен анализ литературы по теме исследования, сформулированы выводы по материалам статьи.

Воронцов М. А. принято участие в постановке задачи и в разработке подхода к ее решению, обсуждении методов исследования и полученных результатов.

Мельниковой А. В. принято участие в обсуждении методов исследования и в анализе полученных результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

К вопросу классификации отказов железнодорожного тягового подвижного состава

Юрий В. Бабков¹, Елена Е. Белова¹, Максим И. Потапов^{1*}

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

*potapovm@vnikti.com



Юрий В. Бабков



Елена Е. Белова



Максим И. Потапов

Резюме. Цель. Установить классификацию отказов железнодорожного тягового подвижного состава, обеспечивающую решение задач обоснованного определения требований надежности к железнодорожному тяговому подвижному составу как объекту железнодорожной транспортной системы, а также организации системной работы по обеспечению его надежности в течение жизненного цикла на требуемом уровне. **Методы.** Произведен анализ терминологии межгосударственных стандартов в области надежности и выполнено сравнение двух классификаций, которые используются ОАО «РЖД» для оценки надежности технических средств и железнодорожного тягового подвижного состава. При исследовании надежности к объектам железнодорожной транспортной системы применяются структурно-логические и логико-вероятностные методы анализа надежности, а для участка железной дороги – теория графов и метод построения цепей Маркова. **Результаты.** Анализ существующих классификаций отказов показал недостатки, которые не позволяют использовать классификации для исследований структурной надежности таких объектов железнодорожной транспортной системы, как железнодорожный тяговый подвижной состав. Разработана классификация, комбинирующая использование двух классификаций отказов («категорирования» – для перевозочного процесса и технических средств, «видов» – для тягового подвижного состава), но уже с новыми формулировками. Предлагаемая классификация видов отказов имеет более строгие формулировки условий и допущений, необходимых для оценки надежности и технического состояния объекта, позволяющие обеспечить взаимосвязь характеристик тягового подвижного состава и его надежности в течение всего жизненного цикла при решении вышеуказанных задач. Совместное использование двух классификаций пригодно для исследований структурных проблем надежности с помощью логико-вероятностных методов и марковских цепей. Разработанная классификация включена в положения проекта межгосударственного стандарта «Надежность железнодорожного тягового подвижного состава. Порядок задания, методы расчета и контроль показателей надежности в течение жизненного цикла», разработка которого выполняется АО «ВНИКТИ» по плану научно-технического развития ОАО «РЖД». **Заключение.** Результаты статьи будут полезны специалистам, занимающимся оценкой надежности железнодорожного тягового подвижного состава.

Ключевые слова: надежность, отказ, неисправность, повреждение, классификация отказов, перевозочный процесс, железнодорожный тяговый подвижной состав, жизненный цикл.

Для цитирования: Бабков Ю.В., Белова Е.Е., Потапов М.И. К вопросу классификации отказов железнодорожного тягового подвижного состава // Надежность. 2021. № 4. С. 12-19. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-4-12-19>

Поступила 20.09.2021 г. / После доработки 11.11.2021 г. / К печати 14.12.2021 г.

Введение

Железнодорожный транспорт для России имеет стратегическое значение: он обеспечивает стабильность работы предприятий и жизни граждан страны, ежедневно перевозит миллионы тонн грузов и сотни тысяч людей [1]. Перевозка грузов и пассажиров железнодорожным транспортом невозможна без железнодорожного тягового подвижного состава (ТПС), качественного и безопасного в эксплуатации.

Одной из важнейших характеристик качества любой техники и, в частности, ТПС является надежность. Согласно ГОСТ 27.002-2015 [2], надежность – это комплексное свойство объекта, которое в зависимости от назначения этого объекта и условий его применения может включать в себя безотказность, ремонтпригодность, восстанавливаемость, долговечность, сохраняемость или определенные сочетания этих свойств, такое как, например, готовность [3].

Как комплексное свойство, надежность количественно определяется показателями перечисленных свойств. Эти показатели позволяют увязывать технические, эксплуатационные и экономические характеристики ТПС, которые в конечном счете обуславливают потребительский выбор того или иного ТПС. Взаимосвязанные технические, эксплуатационные и экономические характеристики формируются на стадиях жизненного цикла (ЖЦ) «Разработка» и «Производство», при этом результат, в том числе экономический, получается уже на стадии ЖЦ «Эксплуатация». Очевидно, что такая ситуация обуславливает наличие возможных эксплуатационных рисков, негативно влияющих на деятельность субъектов, причастных к эксплуатации ТПС в рамках железнодорожной транспортной системы. Распределение этих рисков между субъектами возможно при условии формирования научно обоснованных требований к ТПС в части надежности и совместной системной работы причастных по обеспечению надежности ТПС в течение его ЖЦ [4].

Таким образом, решение задач обоснованного определения требований надежности к ТПС как объекту железнодорожной транспортной системы и организации системной работы по обеспечению надежности ТПС в течение его ЖЦ на требуемом уровне является актуальным. В [5] также указана необходимость формирования нормативного обеспечения для решения вышеперечисленных задач.

Общие подходы к обоснованному определению требований надежности ТПС и организации процесса обеспечения надежности ТПС в течение ЖЦ изложены в [4, 6], что послужило основой при разработке проекта межгосударственного стандарта «Надежность железнодорожного тягового подвижного состава. Порядок задания, методы расчета и контроль показателей надежности в течение жизненного цикла», разработка которого выполняется АО «ВНИКТИ» по плану научно-технического развития ОАО «РЖД» во исполнение программ межгосударственной и национальной стандартизации. В настоящее время окончательная редакция проекта стандарта получила положительное заключение от ТК119 «Надежность в технике» и проходит экспертизу в ТК045 «Железнодорожный транспорт».

Настоящая статья посвящена положениям данного проекта стандарта, которые устанавливают классификацию отказов ТПС, позволяющую обеспечить взаимосвязь характеристик ТПС и его надежности в течение всего ЖЦ при решении вышеуказанных задач.

Реализуемый ОАО «РЖД» перевозочный процесс подвержен влиянию ряда факторов, порождающих риски (рис. 1). Источниками рисков перевозочного процесса, в том числе нарушения графика движения поездов, наряду с внешними причинами могут являться нарушения технологии перевозочного процесса либо отказы технических средств (ТС). Инциденты по причине отказов ТС, в том числе ТПС, классифицируются по степени критичности для перевозочного процесса. На критичность последствий инцидента влияют продолжительность задержки поезда, задержки других поездов и размер ущерба,

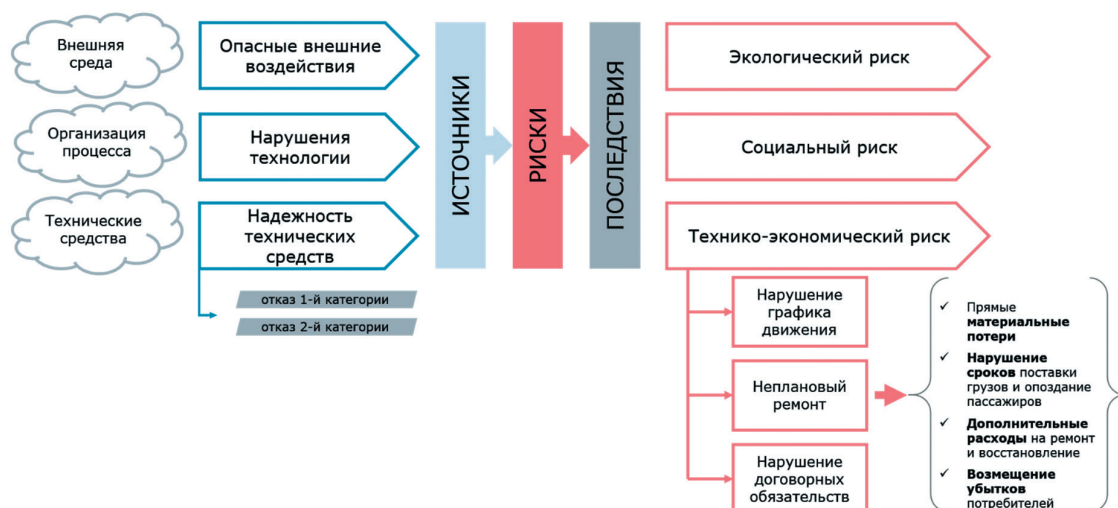


Рис. 1. Общая модель формирования рисков перевозочного процесса

определяемый затратами на восстановление ТС и покрытие убытков потребителей из-за задержки поездов.

Таким образом, для отказов ТС и ТПС в частности характеристиками по последствиям, позволяющими установить факт нарушения их работоспособности, являются:

- невыполнение показателей графика движения поездов (масса поезда, скорость, время хода по участкам и стоянок, время перерыва движения поездов);
- необходимость восстановления работоспособности подвижного состава и постоянных устройств без нарушения графика движения поездов;
- необходимость выполнения непланового ремонта;
- превышение установленного объема работ (восстановление, замена, регулировка любого технического устройства) на плановом техническом обслуживании или ремонте, вызывающее увеличение нормы простоя или трудоемкости, если перечисленные виды работ не входят в объем обязательных работ.

Вышеперечисленное послужило основой для разработки классификации отказов, при этом учитывались терминология в отношении понятий «отказ», «неисправность» («повреждение») и аспекты ТПС как элемента перевозочного процесса.

Термины «отказ», «неисправность» («повреждение»)

Рассмотрим понятия отказа и неисправности (повреждения) с учетом терминологических стандартов ГОСТ 27.002-2015, ГОСТ 18322-2016, ГОСТ 32192-2013 [2, 7, 8] (рис. 2).

Отказ – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния железнодорожной техники [8]. При этом по классификационному признаку возможности последующего применения железнодорожной техники отказ может быть полным или частичным; последнее свойственно сложным системам, состоящим из разного рода элементов и выполняющим отдельные функции в рамках системы. Отказ переводит ТС из работоспособного состояния в не-

работоспособное с последующим восстановлением или списанием в результате достижения предельного состояния. Отказ некоторых элементов, входящих в одну систему, может не вызывать снижения уровня качества функционирования сложной системы при выполнении определенной задачи, поэтому в результате отказа отдельных ее элементов или неисправности (повреждения) технического средства объект переходит в частично работоспособное состояние (неисправное) с последующим восстановлением исправного работоспособного состояния.

Неисправность (повреждение) – событие, заключающееся в нарушении исправного состояния железнодорожной техники при сохранении работоспособного состояния.

Возможна также ситуация, когда устранение неисправности осуществляется только с помощью проведения ремонта. Соответственно, из частично работоспособного состояния объект может переходить посредством ремонта в условно неработоспособное состояние до момента восстановления исправного работоспособного состояния либо выполнить переход в неработоспособное состояние, связанное с обнаружением скрытого отказа железнодорожной техники.

ТПС как элемент перевозочного процесса

Железная дорога представляет собой сложную транспортную систему, состоящую из совокупности ТС, взаимосвязанных в едином технологическом процессе перевозок грузов и пассажиров. При этом каждое из железнодорожных ТС – элемент собственной сложной системы, выполняющий определенную функцию в технологическом процессе перевозок. С точки зрения надежности все элементы этой системы соединены последовательно, т.е. полный отказ одного из них приводит к отказу всей системы, что проиллюстрировано на рис. 3 схемой функциональной целостности (СФЦ) участка железной дороги и ее математической модели, представленной в

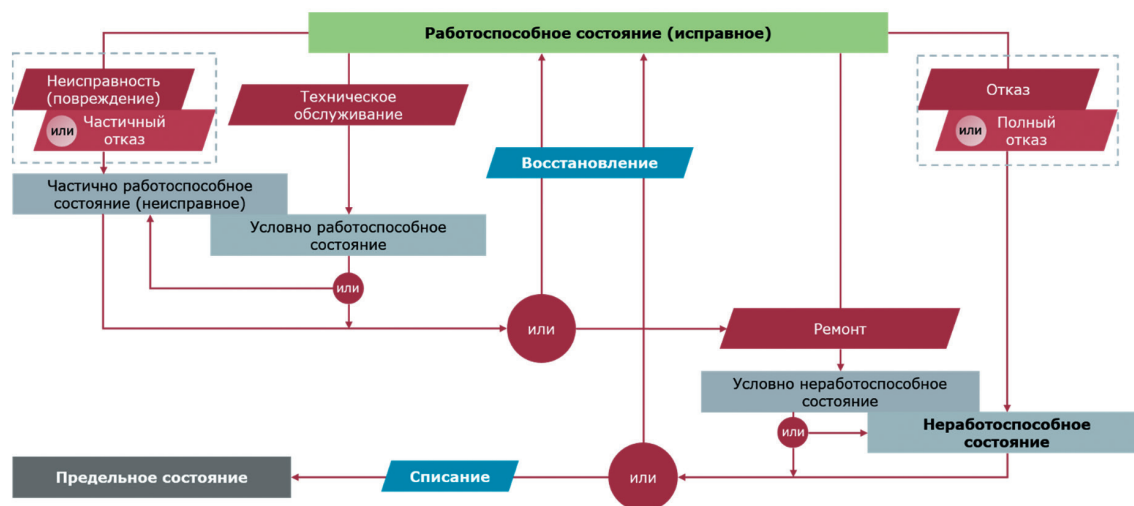


Рис. 2. Состояния сложной технической системы

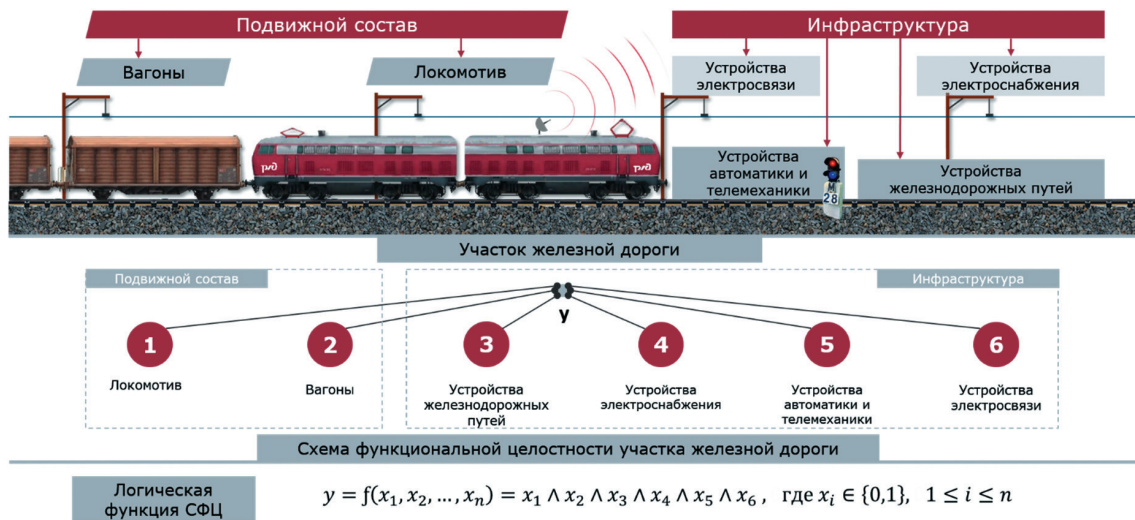
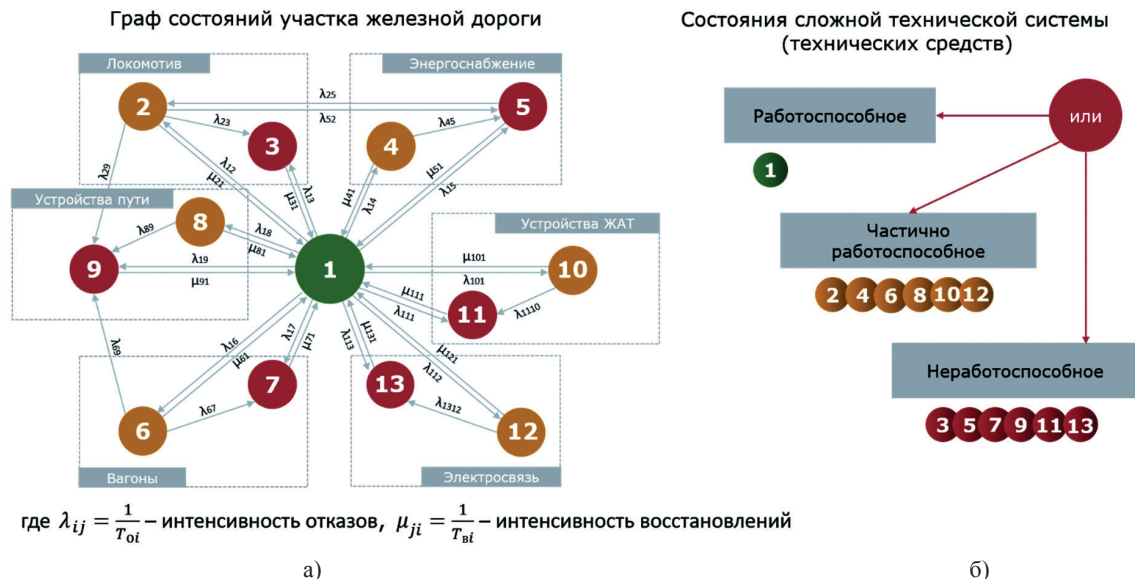


Рис. 3. Подвижной состав как элемент перевозочного процесса



где $\lambda_{ij} = \frac{1}{T_{oi}}$ – интенсивность отказов, $\mu_{ji} = \frac{1}{T_{vi}}$ – интенсивность восстановлений

Рис. 4. Граф состояний участка железной дороги (а) и схема состояний сложной технической системы (б)

виде логической функции, полученной с помощью программного комплекса «Арбитр» [9]. Чтобы выполнить оценку надежности работы такой системы, необходимо прежде всего определить показатели, характеризующие надежность каждого из входящих в нее элементов. Уровень надежности отдельных ТС, входящих в сложную систему, оказывает влияние на качество функционирования всей системы, результативность и экономические показатели работы железных дорог.

Для оценки надежности работы системы в качестве минимально возможного используется гарантийный участок железной дороги между двумя участковыми станциями или между участковой и сортировочной станциями, который представляет собой сложную однофункциональную систему многократного действия [10].

Гарантийный участок железной дороги как сложная система функционирует дискретно в пространстве состояний и непрерывно во времени. Назначение этой системы заключается в обеспечении размеров грузопотока при бес-

перебойном движении поездов в течение длительного интервала времени. При этом интервал времени для расчета принимается исходя из пропускной способности участка, который рассчитывается на заданные сутки. Поток поездов поступают с участковых станций, отправления поездов производятся при условии соблюдения установленного в ОАО «РЖД» минимального безопасного расстояния, устанавливаемого в блок-участках. Вследствие отказов ТПС (локомотивов), вагонов, устройств электро-снабжения, автоматики и телемеханики (ЖАТ), связи и пути, приводящих к закрытию отдельных перегонов, нарушается график движения поездов и, как следствие, снижаются качество и эффективность работы участка. Ранее отмечалось, что в рамках участка железной дороги с точки зрения надежности все элементы соединены последовательно и полный отказ одного из элементов приводит к отказу всей системы. Время между отказами отдельных элементов и время восстановления их работоспособности являются случайными величинами.

С помощью метода «псевдосостояний» имеющий место в этом случае немарковский процесс сводится к марковскому, т.е. когда будущее поведение системы зависит от настоящего и не зависит от предыстории процесса при введении следующих допущений:

1) потоки отказов и восстановлений системы *ординарные*, т.е. в каждый момент времени может отказывать или восстанавливаться не более одного элемента;

2) процесс функционирования системы и ее элементов *стационарный*, т.е. интенсивность появления отказа ТС не зависит от времени и представляет собой значение, равное среднему числу событий, наступивших в единицу времени;

3) время пребывания системы в некоторых состояниях не подчиняется экспоненциальному распределению, но может быть точно или приблизительно представлено распределением Эрланга.

На рис. 4 представлен граф состояний участка железной дороги, где система может находиться в работоспособном состоянии (1) и обеспечивать выполнение графика движения поездов на 100 %, работать с пониженной эффективностью из-за частичного отказа (неисправности (повреждения)) одного из элементов (состояния 2, 4, 6, 8, 10, 12) или в неработоспособном состоянии из-за полного отказа одного из элементов

в результате закрытия участка и выполнения графика движения поездов на 0 % (состояния 3, 5, 7, 9, 11, 13). В данном случае из числа состояний исключены состояния системы, в которых осуществляется выполнение планового технического обслуживания или ремонта.

Переход системы из одного состояния в другое характеризуется отказом или восстановлением только одного элемента системы. Каждый элемент характеризуется средним временем между его отказами T_{oi} и интенсивностью отказов λ_{ji} , средним временем восстановления T_{vi} и интенсивностью восстановления μ_{ji} , где i – состояние элемента перед отказом (после восстановления), j – состояние элемента после отказа (перед восстановлением). В этой модели можно учитывать влияние одних ТС на работоспособность других, например неисправность электровоза (а именно отказ одного из токоприемников) может привести к отказу устройств электроснабжения – обрыву контактного провода.

Система в этом случае определяется начальными вероятностными состояниями и матрицей переходных вероятностей. Исходя из решения этой системы и знания средних значений времени между отказами ТС и времени их восстановления, могут быть рассчитаны предельные вероятности, характеризующие функционирование участка железной дороги со снижением эффективности или же полностью прекращающие движение поездов.

Классификационный признак для технических средств (ГОСТ 32192–2013)	Критерий отказов по КАС АНТ		Состояние системы
	Событие	Продолжительность восстановления	
Отказ 1-й категории	Полный отказ Отказ ТС	 более 1 ч	Неработоспособное
Отказ 2-й категории	Частичный отказ Отказ ТС	 от 6 мин до 1 ч или  от 15 мин до 1 ч	Частично работоспособное
Отказ 3-й категории	Неисправность (повреждение) Повреждение ТС	 без задержек или  до 6 мин или  до 15 мин	Частично работоспособное

а)

Классификационный признак (ГОСТ 31187–2011)	Критерий отказов			Состояние ТПС
	Событие	Тяжесть устранения отказа для перевозочного процесса	Место обнаружения отказа	
Отказ 1-го вида	Отказ ТПС	Вспомогательный локомотив	На линии (рабочее состояние)	Неработоспособное
Отказ 2-го вида	Отказ ТПС	 Задержка более 1 ч	На линии (рабочее состояние)	Неработоспособное
Отказ 3-го вида*	Отказ ТПС	–	В депо приписки	Неработоспособное

*Критерием отказа 3-го вида является постановка на неплановый ремонт

б)

Рис. 5. Инфографика классификаций отказов: а) железнодорожных технических средств по категориям; б) автономного железнодорожного тягового подвижного состава по видам

Анализ существующих классификаций отказов

В настоящее время для оценки надежности работы железнодорожной транспортной системы в ОАО «РЖД» используется «Комплексная автоматизированная система учета, контроля устранения отказов в работе ТС и анализа их надежности» (КАС АНТ). Классификация случаев отказа ТС, в зависимости от их влияния на перевозочный процесс, установлена в [11], при этом используется следующий признак – отказ первой, второй и третьей категории (рис. 5а).

Отказом 1-й категории считаются отказы ТС, приведшие к задержке пассажирского, пригородного или грузового поезда на перегоне (станции) на 1 ч и более либо приведшие к транспортным происшествиям или событиям, связанным с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта.

Отказом 2-й категории считаются отказы, приведшие к задержке на перегоне (станции) пассажирского или пригородного поезда продолжительностью от 6 мин до 1 ч, грузового поезда продолжительностью от 15 мин до 1 ч.

К отказам 3-й категории относятся: неисправности – случаи нарушения нормального функционирования ТС, не имеющие последствий, относящихся к отказам 1-й и 2-й категории, при этом учет случаев неисправности производится первоначально в рамках автоматизированных систем управления хозяйств; повреждения – нарушения исправного состояния ТС, выявленные в процессе планово-предупредительного технического обслуживания эксплуатационным персоналом, в том числе с применением средств диагностики, учитываются вне зависимости от продолжительности задержек поездов, кроме случаев, приведших к транспортным происшествиям или событиям, связанным с нарушением правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта, которые учитываются в 1-й категории.

В 3-й категории также учитываются: нарушения размещения и крепления груза из-за неисправности средств крепления груза в вагоне, находящемся в составе грузового поезда; нарушения, выявленные при проведении технического обслуживания (ТО-1) локомотива, моторвагонного подвижного состава и устраненные силами локомотивных бригад или ремонтного персонала; отцепка грузового вагона от поезда по технической неисправности, выявленной на станции, являющейся окончанием гарантийного участка.

Для оценки надежности автономного тягового подвижного состава ГОСТ 31187-2011, ГОСТ 31428-2011 [12, 13] установлена следующая классификация отказов (рис. 5б):

- отказ 1-го вида – отказ тепловоза, вызвавший вынужденную остановку поезда на перегоне или промежуточной станции, если дальнейшее движение поезда продолжено с помощью вспомогательного локомотива;
- отказ 2-го вида – отказ тепловоза, в результате которого допущена задержка поезда на перегоне хотя бы по одному из путей или на станции сверх времени, установленного графиком движения, на 1 ч и более;

– отказ 3-го вида – отказ тепловоза, требующий выполнения непланового ремонта.

На рис. 6 представлена причинно-следственная модель технико-экономического риска перевозочного процесса, обусловленного надежностью ТПС (локомотивов), а также связь вышеприведенных классификаций отказов (см. рис. 5).

В результате анализа вышеприведенных классификаций с учетом причинно-следственной модели технико-экономического риска перевозочного процесса, обусловленного надежностью ТПС, установлены недостатки обеих классификаций, затрудняющие их использование при оценке надежности ТПС в течение ЖЦ.

Недостатки классификации «категорирования» для оценки надежности ТПС:

- построена по степени влияния на перевозочный процесс железнодорожных ТС;
- критерием тяжести влияния является временной фактор;
- неприменима для стадии разработки.

Недостатками классификации «видов» для оценки надежности ТПС:

- отказ 1-го вида связан с отказами локомотива на линии (рабочим состоянием) в составе поезда;
- отказ 2-го вида тоже связан с отказами локомотива на линии (рабочим состоянием) в составе поезда, но характеризуется временным фактором 1-й категории отказов ТС;
- критерий отказов 3-го вида носит субъективный характер и не отражает проблем технического состояния.

Предлагаемая классификация отказов для ТПС

Для нормирования надежности предлагается уточнить существующую классификацию отказов и неисправностей ТПС по видам в зависимости от тяжести их последствий для перевозочного процесса, места обнаружения этих отказов или повреждений ТПС и способа устранения. Для этого в проекте разрабатываемого ГОСТ «Надежность железнодорожного тягового подвижного состава. Порядок задания, методы расчета и контроль показателей надежности в течение жизненного цикла» данная классификация приведена в следующей редакции:

- отказ 1-го вида обусловлен дефектами, обнаруженными в рабочем состоянии ТПС (ТПС переходит в неработоспособное состояние), при этом его задание невыполнимо, восстановление перевозочного процесса осуществляется с привлечением вспомогательного локомотива, восстановление самого ТПС осуществляется путем проведения ремонта;
- отказ 2-го вида обусловлен дефектами, обнаруженными в рабочем состоянии ТПС (ТПС переходит в частично работоспособное состояние), при этом его задание выполнимо, восстановление перевозочного процесса происходит при условии ограниченного использования неисправного ТПС, функционирующего с применением различных резервных схем,

восстановление ТПС осуществляется путем проведения ремонта;

– неисправность вида А, обусловленная дефектами, обнаруженными в рабочем (ТПС переходит в неисправное работоспособное состояние) и нерабочем состоянии ТПС (на плановом виде ТО или в ожидании работы), при этом восстановление ТПС осуществляется путем проведения ремонта (при обнаружении либо отсрочено);

– неисправность вида Б, обусловленная дефектами оборудования, обеспечивающего санитарно-гигиенические условия проезда пассажиров и работы локомотивной бригады, учет расхода топлива (электроэнергии), а также косвенно влияющего на функционирование ТПС при использовании его по назначению, при этом восстановление ТПС осуществляется путем проведения ремонта при обнаружении.

При этом к неисправностям вида А относятся отказы составных частей ТПС, связанные непосредственно с технически исправным функционированием ТПС при использовании его по назначению, а к неисправностям вида Б относятся отказы оборудования, косвенно влияющего на функционирование ТПС и обеспечивающего потребительскую привлекательность, удобство использования и обслуживания, а также выполнения функциональных требований, не связанных с использованием ТПС по назначению.

Восстановление составных частей ТПС с неисправностями вида А обусловлено требованиями эксплуатационной и ремонтной документации, в отличие от оборудования с неисправностями вида Б, восстановление которого обусловлено требованиями заказчика, потребителя, безопасности, нормативной, конструкторской документации или экологических и санитарно-гигиенических норм.

Остальные дефекты оборудования или составных частей ТПС, являющиеся причинами их повреждений при сохранении работоспособного состояния ТПС, не классифицируются. Такие дефекты устраняются на плановых видах ремонта и/или обслуживания, при которых контроль технического состояния ТПС выполняется с периодичностью и в объеме согласно нормативной и технической документации, а объем и момент начала ремонта определяется техническим состоянием ТПС.

Заключение

Для решения задач обоснованного определения требований надежности к железнодорожному ТПС как объекту железнодорожной транспортной системы, а также организации

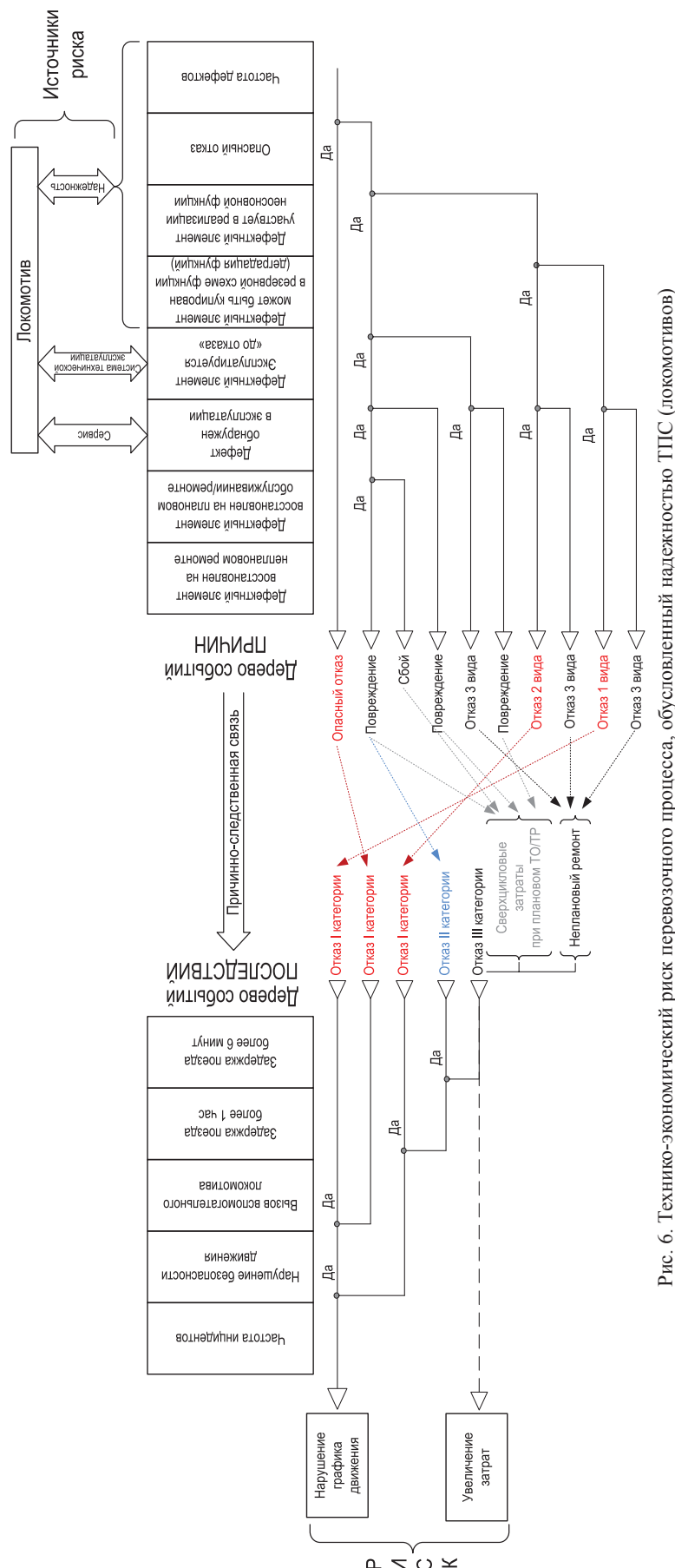


Рис. 6. Технико-экономический риск перевозочного процесса, обусловленный надежностью ТПС (локомотивов)

системной работы по обеспечению его надежности в течение ЖЦ на требуемом уровне разработана классификация, комбинирующая использование двух классификаций отказов: «категорирования» – для перевозочного процесса и технических средств; «видов» – для ТПС, но уже с новыми формулировками. Предлагаемая классификация видов отказов имеет более строгие формулировки условий и допущений, необходимых для оценки надежности и технического состояния объекта, позволяющих обеспечить взаимосвязь характеристик ТПС и его надежности в течение всего ЖЦ при решении указанных задач. Совместное использование двух классификаций пригодно для исследований структурных проблем надежности с помощью логико-вероятностных методов и марковских цепей.

Разработанная классификация включена в положения проекта межгосударственного стандарта «Надежность железнодорожного тягового подвижного состава. Порядок задания, методы расчета и контроль показателей надежности в течение жизненного цикла», разработка которого выполняется АО «ВНИКТИ» по плану научно-технического развития ОАО «РЖД».

Библиографический список

1. ОАО «РЖД» сегодня. URL: company.rzd.ru/ru/9360 (дата обращения 15.09.2021).
2. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. IV, 23 с.
3. Бабков Ю.В., Перминов В.А., Слонков Г.В. и др. Пути перераспределения эксплуатационного риска в условиях рыночных отношений и реформированного локомотивного комплекса ОАО «РЖД» // Железнодорожный транспорт. 2018. № 5. С. 62–66.
4. Назаров О.Н., Бабков Ю.В., Перминов В.А. и др. Формирование научно обоснованных требований к инновационному подвижному составу в части надежности // Вестник ИПЕМ. Техника железных дорог. 2018. № 3. С. 40–49.
5. Белова Е.Е., Драгун В.И., Перминов В.А. и др. Нормативное обеспечение надежности железнодорожного транспорта: прошлое, настоящее, будущее // Стандарты и качество. 2018. № 9. С. 32–35.
6. Клименко Ю.И., Белова Е.Е., Потапов М.И. и др. Процесс обеспечения надежности локомотивов, проектируемых под современные технические требования // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2020. № 1. С. 43–47.
7. ГОСТ 18322-2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2017. II, 13 с.
8. ГОСТ 32192-2013. Надежность в железнодорожной технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2014. IV, 29 с.
9. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования и расчета надежности и безопасности автоматизированных систем управления технологическими процессами на стадии проектирования: ПК «Арбитр» / АО «СПИК СЗМА». URL: szma.com/arbitr/ (дата обращения 10.09.2021).
10. Шишков А.Д. Народнохозяйственная эффективность повышения надежности технических средств железнодорожного транспорта. М.: Транспорт, 1986. 183 с.
11. Положение об учете, расследовании и анализе отказов в работе технических средств на инфраструктуре ОАО «РЖД» с использованием автоматизированной системы КАС АНТ, утвержденное распоряжением ОАО «РЖД» от 01.10.2018 № 2160/р.
12. ГОСТ 31187-2011. Тепловозы магистральные. Общие технические требования. М.: Стандартинформ, 2012. II, 31 с.
13. ГОСТ 31428-2011. Тепловозы маневровые с электрической передачей. Общие технические требования. М.: Стандартинформ, 2011. III, 45 с.

Сведения об авторах

Юрий Валерьевич Бабков – кандидат технических наук, первый заместитель генерального директора – главный инженер АО «ВНИКТИ», ул. Октябрьской революции, 410, Коломна, Московская область, Российская Федерация, 140402, тел. +7(496)618-82-51; e-mail: babkov@bk.com

Елена Евгеньевна Белова – кандидат технических наук, начальник научного центра стандартизации и методологии технического регулирования АО «ВНИКТИ», заведующая кафедрой автоматизации производства и информационных технологий Коломенского института (филиала) Московского политехнического университета, ул. Октябрьской революции, 410, Коломна, Московская область, Российская Федерация, 140402, тел. +7(496)618-16-33; e-mail: belovae@vnikti.com

Максим Игоревич Потапов – заведующий лабораторией надежности АО «ВНИКТИ», ул. Октябрьской революции, 410, Коломна, Московская область, Российская Федерация, 140402, тел. +7(496)618-82-18, доб. 11-98; e-mail: potapovm@vnikti.com

Вклад авторов в статью

Вклад авторов заключается в анализе основной применяемой в области надежности терминологии, установленной межгосударственными стандартами, применительно к железнодорожному транспорту и в сравнении двух классификаций, которые используются в ОАО «РЖД» для оценки надежности технических средств и железнодорожного тягового подвижного состава. Для обоснованного определения требований надежности к железнодорожному ТПС авторами предложено решение, позволяющее комбинировать использование двух классификаций отказов. Вклад авторов равный.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Использование показательного распределения в математических моделях надежности

Борис П. Зеленцов, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск, Российская Федерация
zelentsov@mail.ru



Борис П.
Зеленцов

Резюме. В теории надежности популярным является показательное (экспоненциальное) распределение продолжительности до события или до завершения состояния. Это распределение характеризуется интенсивностью, которая является удобным параметром, используемым в математических моделях и расчетах. Показательное распределение используется при моделировании процессов в области надежности. Приведены примеры, иллюстрирующие приемлемость и целесообразность использования показательного распределения. **Цель.** Целью статьи является совершенствование методов моделирования в области надежности при использовании показательного распределения продолжительности состояний или времени до событий. **Методы.** Предположение о показательном распределении времени между событиями может быть обосновано или отвергнуто на основе методов теории вероятностей и/или математической статистики или на основе жизненного или инженерно-технического опыта. Экспериментально установлено, что поток отказов в устоявшемся режиме эксплуатации обладает свойствами стационарности, ординарности и отсутствия последствия. Такой поток является пуассоновским, его особенность заключается в том, что время между двумя последовательными отказами распределено по показательному закону с постоянной интенсивностью. Это показательное распределение обоснованно распространено на распределение времени безотказной работы объекта. Однако использование показательного распределения для других случаев зачастую производится без должного обоснования. Методический подход и соответствующие выводы основаны на примерах. Приведено несколько примеров, иллюстрирующих неприемлемость показательного распределения на основе жизненного опыта. **Обсуждение.** Рассмотрены примеры, в которых суждение о приемлемости или неприемлемости показательного распределения может быть вынесено на основе жизненного опыта или на основе теории вероятностей. Однако о таких событиях, как завершение восстановления, продолжительность периодического контроля, продолжительность технического обслуживания и т.п., смысловое суждение о применимости показательного распределения не может быть вынесено, если отсутствует жизненный опыт, связанный с этими событиями. Закон распределения этих продолжительностей должен быть установлен статистическими методами. В статье сделана ссылка на публикации автора, в которых проведено сравнение периодичности проверок оборудования с регулярным периодом и с периодом, распределенным по показательному закону. Расчетные значения некоторых показателей сохраняются, а некоторых различаются. Имеет место двукратное расхождение между значениями коэффициента неготовности при рассмотренных способах задания периодичности проверок. **Результаты и выводы.** Предложения по совершенствованию применения показательного распределения при моделировании надежности сводятся к тому, что необходимо четкое обоснование применения показательного распределения времени между различными событиями с привлечением методов теории вероятностей и математической статистики. Неизвестное распределение случайной величины нельзя заменять на показательное распределение без должного обоснования. Замену случайного времени нахождения в подмножестве состояний на случайное время, распределенное по показательному закону с постоянной интенсивностью, следует сопровождать расчетом погрешности.

Ключевые слова: надежность, показательное (экспоненциальное) распределение, интенсивность события.

Для цитирования: Зеленцов Б.П. Использование показательного распределения в математических моделях надежности // Надежность. 2021. №4. С 20-25. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-4-20-25>

Поступила 11.08.2021 г. / После доработки 17.10.2021 г. / К печати 14.12.2021 г.

Введение

Показательное распределение широко используется в математических моделях надежности. Преимущество этого распределения заключается в том, что оно характеризуется одним параметром: интенсивностью события, что обеспечивает простоту модели. В частности, модель с постоянной интенсивностью событий позволяет использовать марковские методы. Интенсивности событий используют также при составлении и решении дифференциальных уравнений равновесия при переходах между состояниями как в переходном, так и в стационарном режимах.

Показательное распределение времени до отказа обосновано вероятностными и статистическими методами. Экспериментально установлено, что отказ объекта является случайным событием, а поток отказов в устоявшемся режиме эксплуатации обладает свойствами стационарности, ординарности и отсутствия последействия. Такой поток является пуассоновским, он имеет простое аналитическое описание. Особенность пуассоновского потока отказов заключается в том, что время между двумя последовательными отказами распределено по показательному закону с постоянной интенсивностью. Это показательное распределение обоснованно распространено на распределение времени безотказной работы объекта.

Показательное распределение моделирует случайное время между двумя последовательными событиями. Показательное распределение распространяют также на различные состояния и события. Его используют для продолжительности восстановления (ремонта) оборудования, времени между проверками технического состояния оборудования и для других случаев. В Интернете приведены многочисленные примеры применения показательного распределения и задачи, основанные на этом распределении.

Однако использование показательного распределения для различных случаев зачастую производится без должного обоснования. При этом приводятся следующие обоснования:

- показательное распределение какого-либо случайного интервала времени применяется по аналогии с распределением времени до отказа;
- интервал времени является случайным, значит, распределен по показательному закону;
- показательное распределение удобно применять в математических моделях;
- все применяют показательное распределение, и я применяю;
- замена постоянного или случайного интервала времени с неизвестным распределением на показательное распределение часто используется в литературе;
- показательное распределение применяется как общепринятое;
- переход от состояния с постоянной продолжительностью к состоянию со случайной продолжительностью происходит в связи с необходимостью моделирования.

Такие обоснования можно назвать «фейковыми». Отсюда следует: если показательное распределение принято без должного обоснования, то его использование в математических моделях может оказаться ошибочным или неприемлемым.

Попробуем разобраться с обоснованием использования показательного распределения.

Обзор источников

Интенсивность отказов как параметр показательного распределения содержится во многих государственных стандартах: [2, 7, 8, 9, 10]. Интенсивность восстановления заложена в [2, 9, 10], а интенсивность ремонта в [7, 8]. Случайная продолжительность технического обслуживания (ремонта) использована в [5].

В [10] приведены преимущества использования марковских методов для исследования надежности различных систем, а также предположения и ограничения для случаев, когда интенсивности отказов и восстановления постоянны во времени. Предположение о постоянстве интенсивности восстановления должно быть обосновано в том случае, если среднее время восстановления не является пренебрежимо малой величиной по сравнению с соответствующим средним временем наработки до отказа. В [10] сказано также, что интенсивности переходов между состояниями используют не только для отказов и восстановлений. Эти переходы могут быть вызваны самыми разнообразными событиями.

В [17] сказано, что предположение об экспоненциальности распределений не всегда оправдано. Особенно это относится к времени восстановления, поскольку предположение о независимости оставшейся длительности восстановления от уже затраченного на это времени довольно неестественно. Однако если в среднем наработка до отказа значительно больше времени восстановления, то многие показатели надежности не зависят от вида распределения времени восстановления.

Использование показательного распределения в области надежности достаточно широко освещено в научной и учебной литературе, например, [15]. Следует отметить, что в теории надежности при необходимости используют не только показательное распределение, но и другие распределения: нормальное, Вейбулла, биномиальное, пуассоновское, гамма-распределение [14, 16].

Статистические методы также широко описаны в литературе, этим методам посвящен ряд государственных стандартов. Так, в [3] приведены процедуры, предназначенные для расчета показателей безотказности объекта на основе данных об аналогичных объектах, данных эксплуатации и испытаний. Стандарт [6] устанавливает статистические методы расчета точечных оценок, доверительных, предикционных и толерантных интервалов для интенсивности отказов объектов, наработки которых на отказ подчиняются экспоненциальному распределению. Приведенные количественные методы применимы к интенсивности других событий, наработки

до появления которых подчиняются экспоненциальному распределению.

Стандарт [4] нацелен на эффективное обеспечение требований безопасности, готовности и экономической эксплуатации изделий. Управление отказами включает в себя действия по техническому обслуживанию, изменению правил применения и другие действия, направленные на ослабление последствий от отказов. Стандарт содержит указания по планированию и проведению испытаний на безотказность и применению статистических методов анализа данных, полученных при испытаниях.

Метод. Примеры использования показательного распределения

Итак, использование постоянной интенсивности различных событий (состояний) в марковских моделях требует серьезного обоснования. Предположение о показательном распределении времени между событиями может быть обосновано или отвергнуто несколькими путями, например:

- 1) на основе методов математической статистики;
- 2) на основе методов теории вероятностей;
- 3) на основе жизненного или инженерно-технического опыта.

Применение методов математической статистики достаточно полно изложено в государственных стандартах.

Суждение о приемлемости или неприемлемости показательного распределения может быть вынесено на основе предположения о независимости оставшейся части времени от уже затраченного времени [17]. Кроме этого подхода суждение о приемлемости или неприемлемости показательного распределения может базироваться на жизненном опыте современного человека. Приведенные примеры с использованием показательного распределения опираются на смысловое содержание и жизненный опыт.

Сначала приведем таблицу значений для функций $P(t) = \exp(-\lambda t)$ и $F(t) = 1 - \exp(-\lambda t)$ в нескольких точках. Это позволит провести анализ приведенных примеров без дополнительных расчетов.

Табл. 1. Значения функций $P(t)$ и $F(t)$

λt	0,125	0,25	0,5	1	2	3
$P(t)$	0,88	0,78	0,61	0,37	0,14	0,05
$F(t)$	0,12	0,22	0,39	0,63	0,86	0,95

В таблице обозначено: $P(t)$ – вероятность того, что событие произойдет на интервале $[t; \infty]$; $F(t)$ – вероятность того, что событие произойдет на интервале $[0; t]$. Если λ – интенсивность отказов, то $P(t)$ – вероятность безотказной работы на интервале $[0; t]$, а $F(t)$ – вероятность отказа на интервале $[0; t]$.

Первый пример связан с ежегодными медицинскими освидетельствованиями, которым подвергаются некоторые категории трудящихся. Предположим, что время между двумя освидетельствованиями распределено по

показательному закону со средним временем 1 год. Тогда интенсивность наступления события «Медицинское освидетельствование» составит $\lambda = 1$ 1/год или $\lambda = 1/12$ 1/мес. Приведем прогнозируемый процент (точнее средний процент) для следующих случаев:

- 1) только 63% работников пройдут обследование в течение года, а 37% – больше, чем через год;
- 2) за 2 года не пройдут обследование 14% работников;
- 3) за 3 года не пройдут обследование 5% работников;
- 4) работники начинают проводить обследование с первых месяцев после предыдущего обследования; так, в течение 3 месяцев обследование пройдут 22%, а за 6 месяцев 39%.

Такая картина не отражает реальную жизнь. Отсюда вывод: показательное распределение времени между профилактическими обследованиями неприемлемо.

Второй пример связан с продолжительностью жизни. Известно, что средняя продолжительность жизни в России составляет 70 лет (женщины живут в среднем побольше, мужчины поменьше, см. Internet). Проведем расчет при предположении о показательном законе распределения продолжительности жизни человека со средним временем $m_t = 70$ лет. Интенсивность события «уход из жизни» $\lambda = 1/70$ 1/год. Среднее квадратическое отклонение времени жизни $\sigma_t = 1/\lambda = 70$ лет. Вычислим вероятность события $0 \leq t \leq m_t + \sigma_t$, то есть вероятность того, что человек проживет от 0 до 140 лет: $P(0 \leq t \leq m_t + \sigma_t) = P(0 \leq t \leq 140) = 0,86$. Вероятность события $t > 140$: $P(t > 140) = 0,14$.

В соответствии с этим расчетом в среднем 14% людей доживают до 140 лет и больше. Далее: до 210 лет доживает 5% людей. Всем известно, что таких людей в России нет. Отсюда вывод: предположение о показательном законе распределения продолжительности жизни человека является неверным, оно должно быть отвергнуто. Этот вывод сделан на основании жизненного опыта и знаний. Если бы этих знаний у нас не было, то 14% был бы принят в качестве реального прогноза. Таким образом, можно сделать вывод: закон распределения продолжительности жизни человека не является показательным. Этот закон распределения должен быть обоснован статистическими методами.

Третий пример связан с 8-часовым рабочим днем. Будем считать, что в связи с необходимостью моделирования некоторого процесса принято предположение о показательном распределении продолжительности рабочего времени с интенсивностью $\lambda = 1/8$ 1/час. В соответствии с этим предположением в течение одного часа рабочие места покинут 12% работников, а в течение 2 часов – 22% работников. Далее. В течение 8 часов на работе пробудет только 37% работников, а 14% будут находиться на работе 16 часов и 5% – целые сутки (24 часа).

Видно, что выводы, сделанные на основе предположения о показательном распределении рабочего времени являются неправдоподобными и даже абсурдными.

Четвертый пример. В математических моделях надежности часто принимается допущение о показательном

распределении времени между проверками технического состояния объекта. Пусть $T_{\text{ср}}$ – среднее время между двумя проверками (средний период) при таком распределении. Тогда, пользуясь данными из табл. 1, можно сделать следующие выводы:

- а) в течение среднего периода проводится только 63% проверок;
- б) 14% и 5% проверок проводятся с периодом, превышающим средний период в два и три раза соответственно;
- в) 39% проверок проводятся с периодом, который в два раза меньше среднего.

Можно предположить, что специалист с достаточным инженерным опытом не примет такого распределения вероятностей, связанного с контролем технического состояния объекта.

Пример использования показательного распределения без обоснования

Следует отметить, что использование показательного распределения без обоснования может быть целесообразным при решении некоторых (специальных) задач. В качестве примера можно привести задачу о катастрофе двух самолетов, опубликованную в [13].

В некотором государстве катастрофы самолетов, приводящие к гибели людей, происходят в среднем один раз в год. В средствах массовой информации появилось сообщение о том, что два самолета на разных маршрутах потерпели катастрофу с интервалом в одну минуту. Первоначальное объяснение причины этой катастрофы сводилось к техническим неполадкам (отказам) оборудования. Проведем вероятностный анализ этой ситуации. Целью этого анализа является объяснение причины этих катастроф: подтвердить или опровергнуть причину катастрофы, связанную с техническими неполадками (отказами). Для этого примем предположение о показательном распределении времени между катастрофами (без должного обоснования).

Обозначим: A – катастрофа первого самолета, B – катастрофа второго самолета через одну минуту после катастрофы первого. Вероятность совместного наступления этих событий, в соответствии с теоремой умножения вероятностей: $p(AB) = p(A) \cdot p(B/A)$, где $p(B/A)$ – условная вероятность катастрофы второго самолета при условии, что катастрофа первого произошла. Очевидно, что $p(A) < 1$. Отсюда следует, что $p(AB) < p(B/A)$.

Вычислим условную вероятность $p(B/A)$ при предположении о показательном распределении времени между катастрофами самолетов. По условию задачи интенсивность катастроф $\lambda = 1$ /год. Переведем интенсивность катастроф и время между двумя катастрофами в одну и ту же единицу времени, а именно, в часы: $\lambda = 1/(365 \cdot 24) = 1/\text{час}$; $t = 1 \text{ мин} = 1/60 \text{ час}$. Вычислим произведение λt : $\lambda t = 1/(365 \cdot 24 \cdot 60) = 2 \times 10^{-6}$. Формула для вычисления условной вероятности катастрофы второго самолета при условии, что за минуту до нее была катастрофа

первого имеет вид: $p(B/A) = 1 - e^{-\lambda t}$. Разложим показательную функцию в степенной ряд, ограничившись двумя членами разложения: $e^{-\lambda t} \approx 1 - \lambda t$. Вычислим условную вероятность: $p(B/A) = \lambda t = 2 \times 10^{-6}$. Вероятность совместного наступления двух событий может быть оценена неравенством сверху: $p(AB) < 2 \times 10^{-6}$.

Итак, получена верхняя граница вероятности совместного наступления двух катастроф самолетов при предположении о показательном распределении времени между катастрофами: 2×10^{-6} . Эта вероятность близка к нулю. Ввиду этого рассматриваемое событие AB следует признать практически невозможным. Тот факт, что это событие все же произошло, с точки зрения теории вероятностей следует расценить так: практически достоверно можно утверждать, что катастрофа двух самолетов произошла не случайно.

Примечания. 1. Цель задачи достигнута: показано, что рассматриваемое случайное событие является практически невозможным.

2. Для решения этой задачи можно использовать другие распределения. Так, при равномерном распределении времени между катастрофами получен результат $p(AB) < 10^{-6}$. Оба результата являются сопоставимыми, вывод из них один и тот же.

Историческая справка. 24 августа 2004 года совершен подрыв двух лайнеров террористками-смертницами. Вылетевшие из аэропорта «Домодедово» пассажирские самолеты упали с разницей в три минуты («Новая газета» от 14.09.2011).

Пример замены некоторого распределения на показательное распределение

Приведем пример замены распределения времени нахождения в подмножестве состояний на показательное распределение этого времени. В [18] рассмотрены переходы в непрерывном времени между работоспособным, предотказным и неработоспособным состояниями, при этом из работоспособного состояния возможен переход в предотказное состояние, а из предотказного состояния – в неработоспособное состояние в результате отказа.

Вероятность безотказной работы, или вероятность нахождения в работоспособном или предотказном состоянии при начальном работоспособном состоянии, полученная на основе решения дифференциальных уравнений:

$$P_{\text{рп}}(t) = \frac{\lambda_{\text{по}} \cdot \exp(-\lambda_{\text{п}} \cdot t) - \lambda_{\text{п}} \cdot \exp(-\lambda_{\text{по}} \cdot t)}{\lambda_{\text{по}} - \lambda_{\text{п}}}, \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{п}}$ – интенсивность предотказов; $\lambda_{\text{по}}$ – интенсивность отказов после предотказов.

Функция распределения времени безотказной работы $F_{\text{рп}}(t) = 1 - P_{\text{рп}}(t)$. (2)

Среднее время наработки на отказ (или среднее время нахождения в работоспособном и предотказном состояниях) в рамках такой модели составляет

$$T_{\text{рп}} = \int_0^{\infty} P(t) dt = \frac{1}{\lambda_{\text{п}}} + \frac{1}{\lambda_{\text{по}}}. \quad (3)$$

Отсюда следует:

$$T_{\text{рп}} = T_{\text{п}} + T_{\text{по}}, \quad (4)$$

где $T_{\text{п}} = 1/\lambda_{\text{п}}$ – среднее время наработки на предотказное состояние; $T_{\text{по}} = 1/\lambda_{\text{по}}$ – среднее время наработки между состоянием предотказа и состоянием отказа.

Соотношение (4) приведено в [1]. Кроме того, распределение времени в данном подмножестве состояний заменено на показательное распределение времени наработки на отказ с интенсивностью $\lambda_{\text{о}}$, которая связана с интенсивностями $\lambda_{\text{п}}$ и $\lambda_{\text{по}}$ соотношением:

$$\frac{1}{\lambda_{\text{о}}} = \frac{1}{\lambda_{\text{п}}} + \frac{1}{\lambda_{\text{по}}}. \quad (5)$$

Таким образом, сделано предположение о показательном распределении времени наработки на отказ с интенсивностью $\lambda_{\text{о}}$. Однако замена распределения (1) на показательное распределение требует обоснования. Из (5) следует:

$$\lambda_{\text{о}} = \frac{\lambda_{\text{п}} \cdot \lambda_{\text{по}}}{\lambda_{\text{п}} + \lambda_{\text{по}}}, \quad (6)$$

а вероятность безотказной работы $P_{\text{о}}(t)$ и функция распределения времени наработки на отказ $F_{\text{о}}(t)$ при показательном распределении с интенсивностью отказов $\lambda_{\text{о}}$ вычисляются по формулам:

$$P_{\text{о}}(t) = \exp(-\lambda_{\text{о}} \cdot t); F_{\text{о}}(t) = 1 - \exp(-\lambda_{\text{о}} \cdot t). \quad (7)$$

Рассмотрим разные соотношения между исходными параметрами в рамках данной модели. Возьмем за основу интенсивность предотказов $\lambda_{\text{п}} = 10^{-5}$ 1/час. Для наглядного представления будем отсчитывать время в годах. Для этого представим интенсивность предотказов $\lambda_{\text{п}} = 10^{-5} \cdot 365 \cdot 24 = 0,0876$ 1/год.

Рассмотрим три варианта соотношений между $\lambda_{\text{п}}$ и $\lambda_{\text{по}}$:

- 1) $\lambda_{\text{по}} = 2\lambda_{\text{п}}$, $\lambda_{\text{о}} = 2\lambda_{\text{п}}/3$; 2) $\lambda_{\text{по}} = 10\lambda_{\text{п}}$, $\lambda_{\text{о}} = 10\lambda_{\text{п}}/11$;
- 3) $\lambda_{\text{по}} = 100\lambda_{\text{п}}$, $\lambda_{\text{о}} = 100\lambda_{\text{п}}/101$.

На рис. 1 а, б, в приведены графики зависимости функции распределения $F_{\text{рп}}(t)$ и $F_{\text{о}}(t)$ для этих вариантов соответственно. Из приведенных графиков видно, что при принятых соотношениях между исходными параметрами имеет место расхождение между функциями распределения $F_{\text{рп}}(t)$ и $F_{\text{о}}(t)$ во всех вариантах.

Видно, что расхождения между $F_{\text{рп}}(t)$ и $F_{\text{о}}(t)$ уменьшаются с увеличением интенсивности отказов после

предотказов. Это обстоятельство отмечено в [1]: из данных эксплуатации кабельных магистралей в подавляющем числе случаев имеет место соотношение $T_{\text{п}} \gg T_{\text{по}}$. Тогда $\lambda_{\text{о}} \approx \lambda_{\text{п}}$.

Следует отметить, что интервал времени 1 год на рис. 1 является достаточным для заключения о том, что при расчете показателей надежности при использовании $F_{\text{рп}}(t)$ и $F_{\text{о}}(t)$ будут получены разные значения. Отсюда следует, что замену исходного процесса на процесс с показательным распределением необходимо сопровождать расчетом погрешности.

Обсуждение

Итак, в статье рассмотрены примеры некоторых событий и вынесено суждение о применимости показательного распределения. Однако о таких событиях, как завершение восстановления, продолжительность периодического контроля, продолжительность периода технического обслуживания и т.п., смысловое суждение о применимости показательного распределения не может быть вынесено, если отсутствует жизненный опыт, связанный с этими событиями.

Аналогичные выводы можно сделать относительно периодичности проверок технического состояния различного оборудования. Например, время между поверками счетчиков потребления воды и электрической энергии не может быть распределенным по показательному закону, так как потребители не будут существенно уменьшать сроки между поверками, а компании не будут допускать больших интервалов между поверками. Реальная ситуация заключается в том, что время между поверками все-таки является случайным. Но оно распределено не по показательному закону. Закон распределения этого времени должен быть установлен статистическими методами.

В [11, 12] исследованы модели эксплуатации объекта, который подвергается проверкам с постоянным периодом и с периодом, распределенным по показательному закону. Сравнение этих моделей проведено при одном и том же значении постоянного периода и среднего времени между поверками. Получены формулы для расчета коэффициента готовности, коэффициента неготовности и некоторых других показателей эксплуатации объекта. Расчетные значения некоторых показателей на основе этих моделей совпадают: например, средняя частота проверок; а некоторых различаются. Так, имеет место

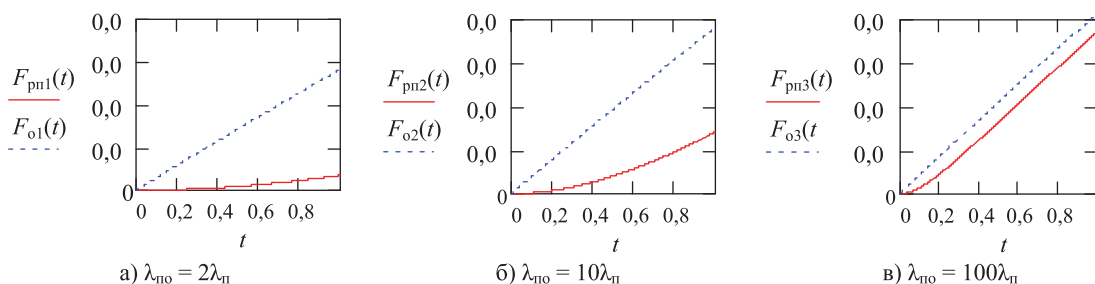


Рис. 1. Функции распределения $F_{\text{рп}}(t)$ и $F_{\text{о}}(t)$ на интервале времени 1 год при различных соотношениях между исходными параметрами.

двукратное расхождение между значениями коэффициента неготовности при рассмотренных способах задания периодичности проверок.

Следует дать четкое обоснование использования показательного распределения или обоснования постоянной интенсивности события (завершения состояния). Это обоснование может быть проведено на основе теории вероятностей, математической статистики или на какой-либо другой основе.

Результаты и выводы

Итак, на приведенных примерах показано, что использование показательного распределения для моделирования случайного времени между событиями является неприемлемым после анализа смыслового содержания примера.

По результатам данной статьи можно сделать следующие выводы.

1. Незвестное распределение случайной величины нельзя заменять на показательное распределение без должного обоснования. Другими словами: использовать показательное распределение для моделирования неизвестного распределения следует с обоснованием.

2. Замена случайного времени нахождения в подмножестве состояний на случайное время, распределенное по показательному закону с постоянной интенсивностью, требует соответствующего обоснования.

3. Приближенные расчеты необходимо сопровождать расчетом погрешности.

Библиографический список

1. Алексеев Е.Б., Гордиенко Н.В., Крухмалев В.В. и др. Проектирование и техническая эксплуатация цифровых телекоммуникационных систем и сетей. М.: Горячая линия-Телеком, 2017. 392 с.
2. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 23 с.
3. ГОСТ Р 27.013-2019. Надежность в технике. Методы оценки показателей безотказности. М.: Стандартинформ, 2019. 30 с.
4. ГОСТ Р 27.607-2013. Надежность в технике. Управление надежностью. Условия проведения испытаний на безотказность и статистические критерии и методы оценки их результатов. М.: Стандартинформ, 2015. 50 с.
5. ГОСТ 18322-2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2017. II, 13 с.
6. ГОСТ Р 50779.26-2007. Статистические методы. Точечные оценки, доверительные, предикционные и толерантные интервалы для экспоненциального распределения. М.: Стандартинформ, 2008. IV, 26 с.
7. ГОСТ Р 51901.5-2005. Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности. М.: Стандартинформ, 2005. IV, 43 с.
8. ГОСТ Р 51901.14-2007. Менеджмент риска. Структурная схема надежности и булевы методы. М.: Стандартинформ, 2008. IV, 23 с.

9. ГОСТ Р 53480-2009. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2010. 32 с.

10. ГОСТ Р МЭК 61165-2019. Надежность в технике. Применение марковских методов. М.: Стандартинформ, 2019. IV, 26 с.

11. Зеленцов Б.П., Трофимов А.С. Исследование моделей расчета надежности при разных способах задания периодичности проверок // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 1 (25). С. 35-44.

12. Зеленцов Б.П., Трофимов А.С. Исследование влияния способа задания периодичности проверок на надежность объекта // Вестник СибГУТИ. 2019, № 1. С. 62-69.

13. Зеленцов Б.П., Тутынина О.И. Теория вероятностей в познавательных и забавных задачах. М.: Либроком, 2013. 128 с.

14. Каштанов В.А., Медведев А.И. Теория надежности сложных систем: Уч. Пособие. М.: Физматлит, 2010. 608 с.

15. Литвиненко Р.С., Идеятуллин Р.Г., Аухадеев А.Э. Анализ использования показательного распределения в теории надежности технических систем // Надежность и качество сложных систем. 2006, № 2. С. 17-22.

16. Литвиненко Р.С., Павлов П.П., Идеятуллин Р.Г. Практическое применение непрерывных законов распределения в теории надежности технических систем // Надежность и качество сложных систем. 2016, № 4. С. 17-23.

17. Надежность технических систем: Справочник / Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин др.; Под ред. И.А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985. 608 с.

18. Zelentsov B.P., Shuvalov V.P., Dugaev D.A. et al. On Reliability of Fiber-Optic Link of PON under Periodic Control and Pre-failure Detections // 1 st International Conference Problems of Informatics, Electronics, and Radio Engineering (PIERE). 2020. P. 261-265.

Сведения об авторе

Борис Павлович Зеленцов – доктор технических наук, профессор кафедры высшей математики Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики, Новосибирск, Российская Федерация, e-mail: zelentsovb@mail.ru

Вклад автора в статью

Автор провел анализ применения показательного распределения времени между состояниями при его использовании в математических моделях. Изложенный подход может быть использован для более обоснованных рекомендаций по применению показательного распределения в области надежности.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Оценка прочности и ресурса для установления назначенного срока службы колесной пары скоростного вагона-платформы

Григорий М. Волохов¹, Эдуард С. Оганьян¹, Гаджимет И. Гаджиметов¹, Дмитрий А. Князев^{1*}, Виталий В. Чунин¹, Максим В. Тимаков¹

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

*knyazev-da@vnikti.com



Григорий М. Волохов



Эдуард С. Оганьян



Гаджимет И. Гаджиметов



Дмитрий А. Князев



Виталий В. Чунин



Максим В. Тимаков

Резюме. Цель. Наиболее ответственным узлом железнодорожного подвижного состава является колесная пара, поскольку излом колеса или оси может иметь катастрофические последствия. Поэтому при постановке на производство скоростного вагона-платформы, предназначенного для эксплуатации со скоростями до 140 км/ч и не имеющего аналогов на сети железных дорог колеи 1520 мм, необходимо было исследовать возможность применения стандартной колесной пары для высокоскоростного движения. С целью обеспечения безопасной эксплуатации колесной пары на сети железных дорог к ней предъявляются требования, которые должны подтверждаться путем оценки параметров прочности и долговечности [1]. Оценка соответствия продукции требованиям может осуществляться с учетом стандартов, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований [1], или с применением иных документов. **Методы.** В статье описаны расчетно-экспериментальные методы, которые использовались для подтверждения прочности и оценки ресурса (долговечности) в вероятностной постановке элементов колесной пары. В качестве экспериментальных данных были привлечены результаты проведенных натурных стендовых испытаний колесных пар на усталость методом кругового изгиба как наиболее приближенных к условиям их нагружения в эксплуатации, по результатам которых подтверждены пределы выносливости оси и колеса в составе колесной пары. Расчетным путем выполнен анализ напряженно-деформированного состояния колесной пары от действия монтажных и эксплуатационных нагрузок при различных режимах движения. **Результаты.** Проведенные исследования подтвердили соответствие колесной пары требованиям [1–3] в части значений коэффициентов запаса сопротивления усталости и пределов выносливости, что исключает возникновение опасной ситуации при эксплуатации скоростного вагона-платформы. Проведена оценка ресурса до зарождения усталостной трещины элементов колесной пары с использованием характеристик сопротивления усталости деталей и эквивалентных амплитуд динамических напряжений от эксплуатационных нагрузок. По результатам этой оценки представляется возможным установить с принятой вероятностью разрушения назначенный срок службы оси колесной пары 32 года, что соответствует назначенному сроку службы вагона-платформы по комбинированному критерию. По данной тематике проводится актуализация нормативно-технической документации, необходимой для создания вагона-платформы для перевозки контейнеров, и разрабатывается новый ГОСТ. **Заключение.** В результате выполненной оценки соответствия установлено, что колесная пара вагона-платформы соответствует требованиям безопасности [1] и обеспечивает отсутствие недопустимых рисков, связанных с причинением вреда жизни и здоровью граждан, животных и растений, окружающей среде и имуществу физических и юридических лиц при эксплуатации вагона-платформы.

Ключевые слова: колесная пара, напряженно-деформированное состояние, сопротивление усталости, предел выносливости, кривая усталости, ресурс, назначенный срок службы.

Для цитирования: Волохов Г.М., Оганьян Э.С., Гаджиметов Г.И., Князев Д.А., Чунин В.В., Тимаков М.В. Оценка прочности и ресурса для установления назначенного срока службы колесной пары скоростного вагона-платформы // Надежность. 2021. № 4. С. 26-30. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-4-26-30>

Поступила 20.09.2021 г. / После доработки 31.10.2021 г. / К печати 14.12.2021 г.

Введение

В настоящее время в рамках совместного проекта с АО «ФГК» создается шестиосный 80-футовый вагон-платформа на трехосных тележках с эксплуатационной скоростью движения до 140 км/ч и осевой нагрузкой до 20,5 тс для перевозки крупнотоннажных контейнеров. Платформа в составе грузового поезда постоянного формирования не имеет аналогов на «пространстве 1520» с точки зрения конструктивных особенностей и допускаемых скоростей ее эксплуатации. Платформа пригодна для эксплуатации как в поездах, состоящих из аналогичных вагонов, так и в виде отдельной платформы в составе грузового поезда по всей сети железных дорог колеи 1520 мм (РФ, страны СНГ, Финляндия, Польша, Украина, Латвийская Республика, Литовская Республика, Эстонская Республика, Грузия).

В соответствии с приложением 2 [1] платформа подлежит обязательному подтверждению соответствия (в форме сертификации). При этом, согласно п. 5 статьи 6 [1], оценка соответствия продукции требованиям [1] может осуществляться с учетом стандартов, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований [1], или с применением иных документов.

Наиболее ответственным узлом вагона-платформы является колесная пара, которая в целом и ее составные элементы (ось и колесо) должна подвергаться обязательной сертификации [1, 2]. В указанных нормативных документах предъявляются требования к безопасности, которые должны подтверждаться путем оценки параметров прочности и долговечности (ресурса) осей и колес колесных пар. Так, для железнодорожного подвижного состава в статье 4 п. 57 [1] имеется требование о том, что «колеса, оси ... колесных пар железнодорожного подвижного состава ... грузовых вагонов должны иметь запас статической прочности и необходимый коэффициент запаса сопротивления усталости, которые обеспечивают стойкость к образованию и развитию дефектов (трещин) в течение указанного в конструкторской документации срока службы».

Поддерживающим стандартом для оценки прочности оси и колеса вагонных колесных пар (грузовых и пассажирских) и немоторных колесных пар моторвагонного подвижного состава (в том числе и высокоскоростного) является [3].

Оценка прочности

В п. 4.3.11–4.3.12 [3] содержатся требования к коэффициентам запаса сопротивления усталости, статической прочности и пределам выносливости оси и колеса в составе колесной пары для колесных пар, не указанных в приложении А. Серийные грузовые колесные пары, согласно приложению А [3], имеют максимальную конструкционную скорость 120 км/ч; таким образом, необходимо подтверждение данной колесной парой,

имеющей конструкционную скорость 140 км/ч (рис. 1), требований п. 4.3.11–4.3.12 [3].

Для расчетной оценки коэффициентов запаса сопротивления усталости элементов колесной пары необходимо экспериментальное подтверждение предела выносливости, полученного по результатам испытаний на усталость и построения кривой усталости.

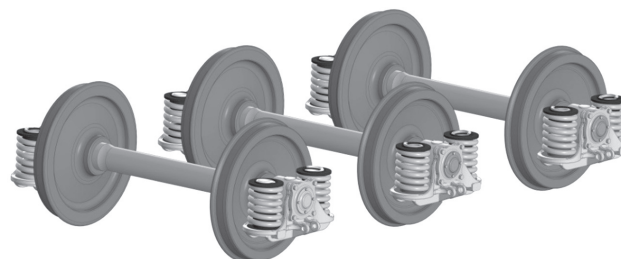


Рис. 1. Колесные пары трехосной тележки скоростного вагона-платформы

В качестве экспериментальных данных использованы результаты ранее проведенных специалистами АО «ВНИКТИ» стендовых испытаний на усталость осей и колес методом кругового изгиба как наиболее приближенных к условиям нагружения их в эксплуатации [4].

В соответствии с методикой испытаний колесной пары, три объекта испытаний оси и три объекта испытаний колес (доработанные оси с технологическими ступицами и колеса с доработанными осями) устанавливались в стенд (рис. 2). Монтаж тензорезисторов производился цепочкой в меридиональном и тангенциальном направлениях в виде розеток на наиболее нагруженной стороне колеса. Затем монтировались измерительные схемы, и посредством измерительно-вычислительного комплекса были выполнены замеры амплитуд напряжений (деформаций). Нагружение объекта испытаний производилось путем вращения неуравновешенной массы, которая устанавливалась на конце его оси. Под воздействием изгибающего момента в объекте испытаний возникали амплитуды напряжений

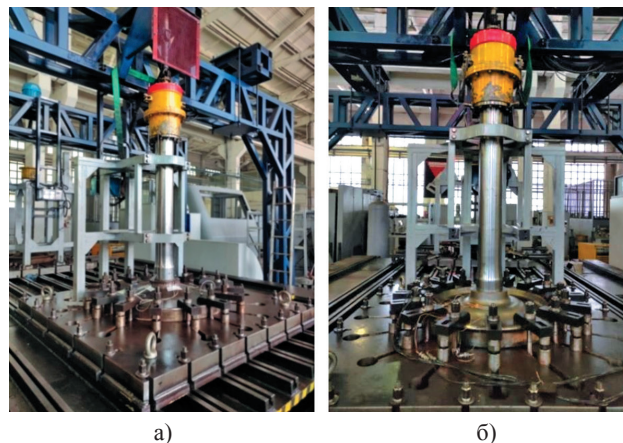


Рис. 2. Стенд с установленными в нем объектами испытаний – осью (а) и колесом (б)

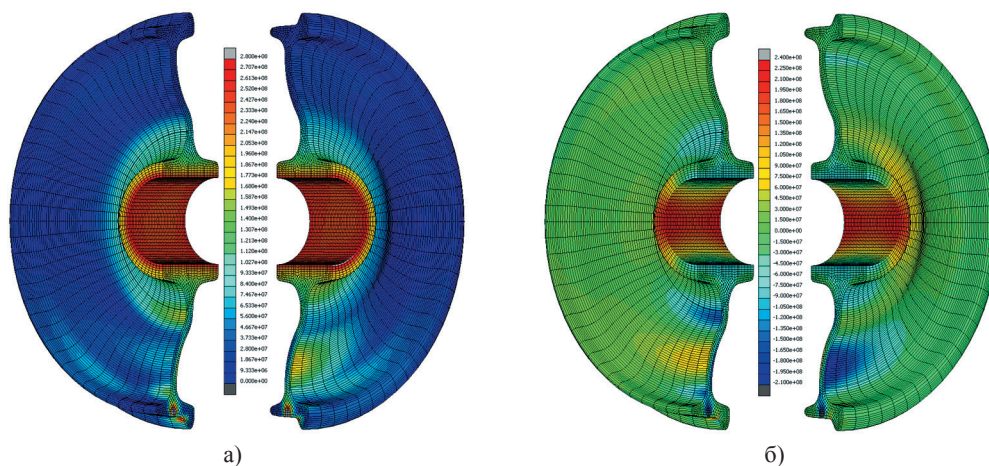


Рис. 3. Распределение эквивалентных (а) и радиальных напряжений (б) с максимально изношенным ободом при движении в кривых участках пути

(деформаций), путем изменения частоты вращения неуравновешенной массы устанавливались требуемые величины амплитуды напряжений.

По результатам испытаний на усталость подтвержден фактический предел выносливости с 50-процентной вероятностью разрушения наиболее нагруженной заподступичной части оси, равный 180 МПа (при требуемом 160 МПа [2]), и фактический предел выносливости цельнокатаного колеса, равный 225 МПа (при требуемом 150 МПа [2]), на нормированной базе испытаний 50 и 20 млн циклов нагружений соответственно [3].

Расчетная оценка напряженно-деформированного состояния колесной пары показала, что максимальные амплитуды напряжений, возникающие в эксплуатации наиболее нагруженной зоны колеса (рис. 3), составляют 97 МПа. С учетом результатов испытаний колес и расчетных коэффициентов, учитывающих зависимость сопротивления усталости от суммарного среднего напряжения цикла в эксплуатации, определяется коэффициент запаса сопротивления усталости, который составил 2,54 при минимально допустимом 1,5.

Расчет оси показал, что наиболее нагруженной частью оси является заподступичная, где амплитуда максимальных механических напряжений в эксплуатации составляет 144 МПа. С учетом полученного предела выносливости по результатам испытаний коэффициент запаса составил 1,25 при минимально допустимом 1,2.

Таким образом, проведенная расчетно-экспериментальная оценка подтвердила соответствие колесной пары требованиям [1, 3] в части значений коэффициентов запаса сопротивления усталости и пределов выносливости.

Оценка ресурса

В п. 3 статьи 4 [1] указано: «Безопасность железнодорожного подвижного состава и его составных частей должна обеспечиваться путем: ... в) установления назначенных сроков службы и (или) ресурсов

продукции, а также проведения технических обслуживаний и ремонтов с необходимой периодичностью; ... е) установления критериев предельных состояний продукции».

Согласно п. 7 статьи 4, «выбранные проектировщиком (разработчиком) конструкции железнодорожного подвижного состава и его составных частей должны быть безопасны в течение назначенного срока службы и (или) ресурса, назначенного срока хранения, а также выдерживать воздействия и нагрузки, которым они могут подвергаться в процессе эксплуатации».

Таким образом, безопасность эксплуатации осей и колес колесных пар должна обеспечиваться в течение назначенного срока службы, который должен устанавливаться исходя из определения их предельного состояния и ресурса с учетом некоторого запаса.

Поскольку подвижной состав используется на всей сети железных дорог (а значит, условия эксплуатации: температура, текущее состояние пути, рельеф местности и т.д. – могут существенно отличаться, что влияет на интенсивность нагрузок), ресурс оси и колеса по накоплению усталостных повреждений должен определяться с учетом всей совокупности отличий в эксплуатации типа подвижного состава. Излом оси или колеса может иметь пагубные последствия, поэтому за критерий предельного состояния принимается момент зарождения трещины.

При этом для оценки ресурса оси и колеса колесной пары необходимо установить:

- характеристики прочности деталей в вероятностном аспекте;
- эксплуатационную нагруженность.

На основе полученных данных ресурс определяется с необходимыми вероятностными параметрами. Настоящая оценка ресурса и срока службы оси и колеса колесной пары выполнена расчетно-экспериментальным методом.

При аналитическом решении [5] расчет выполняется с использованием характеристик сопротивления уста-

лости детали (по результатам стендовых испытаний на усталость) и амплитуды (эквивалентной) динамических напряжений от эксплуатационных нагрузок. Для этого из уравнения кривой усталости (второй наклонной ветви) находим число циклов нагружения детали до исчерпания несущей способности (разрушения) N_p :

$$\sigma_{-1\sigma}^{m_2} \cdot N_0 = \sigma_{a\sigma}^{m_2} \cdot N_p = const \quad (1)$$

где $\sigma_{-1\sigma}$ – предел выносливости детали на базе испытаний N_0 циклов;

$\sigma_{a\sigma}$ – эквивалентная амплитуда напряжений;

m_2 – показатель наклона кривой.

В расчете использовалась кривая усталости с двумя наклонными ветвями: для чисел до 10^7 циклов показатель наклона левой ветви кривой усталости $m_1 = 7$, для чисел более 10^7 циклов, т.е. для правой ветви, $m_2 = 2m_1 - 1 = 13$.

Полученная кривая позволяет определить медианное значение долговечности, соответствующее вероятности разрушения 50 % ($\bar{\sigma}_{-1\sigma}$). Для расчета с вероятностью разрушения P (%) по таблицам нормального распределения определяются соответствующие квантили и решается уравнение:

$$U_p = \frac{1 - \tilde{n}}{\sqrt{\tilde{n}^2 v_{\sigma_{-1\sigma}}^2 + v_{\sigma_a}^2}}, \quad (2)$$

откуда определяется относительный коэффициент запаса $\tilde{n}$, по которому устанавливается коэффициент перегрузки n_p :

$$n_p = \tilde{n} \cdot n, \quad (3)$$

где $n = \frac{\sigma_{a_{max}}}{\sigma_{-1\sigma}}$ – действительный коэффициент нагруженности;

$v_{\sigma_{-1\sigma}}, v_{\sigma_a}$ – коэффициенты вариации нормально распределенных величин предела выносливости $\sigma_{-1\sigma}$ и максимального напряжения $\sigma_{a_{max}}$ в эксплуатации соответственно.

Коэффициенты вариации характеризуют рассеяние соответствующих величин: чем коэффициенты меньше, тем стабильнее результаты в обеспечении технологий проектирования, изготовления и условий эксплуатации.

Таким образом, предел выносливости пересчитывается с вероятностью разрушения P (%) по формуле:

$$\sigma_{-1\sigma} = \bar{\sigma}_{-1\sigma} (1 - U_p \cdot v_{\sigma_{-1\sigma}}). \quad (4)$$

При принятых коэффициентах вариации нормально распределенных величин предела выносливости оси $v_{\sigma_{-1\sigma}} = 0,1$, максимального эксплуатационного напряжения $v_{\sigma_a} = 0,2$, вероятности разрушения $P = 0,1$ % квантиля $U_p = -3,09$ по формуле (1) получаем $N_p = 8,2 \times 10^9$ циклов нагружений.

Согласно зависимости $n_N = \phi(n_\sigma)$, между коэффициентом запаса по напряжению и запасом по долговечности получаем $N_{сум} = 2,9 \times 10^9$ циклов нагружений до исчерпания несущей способности. При пересчете в километры пробега ресурс оси составит $8,7 \cdot 10^6$.

Исходя из принятого среднего годового пробега скоростного вагона-платформы в 250 тыс. км расчетный срок службы с принятой вероятностью разрушения 0,1 % составит 34,7 лет.

Колеса в составе колесной пары являются сменными элементами, и в эксплуатации их отбраковывают при достижении предельного состояния по геометрии, которое происходит в диапазоне от 300 до 800 тыс. км. Расчетная оценка ресурса колеса показала, что ресурс по усталости дисковой части значительно выше эксплуатационного пробега, а значит, разрушения колеса не произойдет.

В расчете принималось, что физико-механические характеристики материала за срок службы не изменяются, коррозии и другим агрессивным средам не подвергаются. С учетом ограниченного числа экспериментальных данных, а также вероятности увеличения их разброса вследствие невозможности учета всех влияющих факторов для обеспечения надежности и безопасности эксплуатации осей и колес, представляется возможным установить назначенный срок службы оси 32 года, что соответствует назначенному сроку службы вагона-платформы по комбинированному критерию.

Таким образом, представленным расчетом определена долговечность элементов колесной пары как ответственной детали подвижного состава.

Выводы

Проведенная расчетно-экспериментальная оценка прочности подтвердила соответствие колесной пары требованиям [1, 3] в части значений коэффициентов запаса сопротивления усталости и пределов выносливости. Представлена расчетно-экспериментальная оценка ресурса оси и колеса колесной пары создающегося скоростного вагона-платформы, которая основана на кривой усталости в вероятностной постановке. Назначенный срок службы оси определен в 32 года.

Библиографический список

1. О безопасности железнодорожного подвижного состава: технический регламент Таможенного союза: ТР ТС 001/2011.
2. О безопасности высокоскоростного железнодорожного транспорта: технический регламент Таможенного союза: ТР ТС 002/2011.
3. ГОСТ 4835-2013. Колесные пары железнодорожных вагонов. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2006. III, 31 с.
4. Результаты стендовых испытаний на усталость осей и цельнокатаных колес колесной пары скоростной вагон-платформы: протокол: 15-30-21. Коломна, АО «ВНИКТИ», 2021. 17 с.
5. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени / под ред. А.П. Гусенкова. М.: Машиностроение, 1993. 364 с.

Сведения об авторах

Григорий Михайлович Волохов – доктор технических наук, заведующий отделением динамики и прочности подвижного состава и инфраструктуры АО «ВНИКТИ», ул. Октябрьской революции, 410, г. Коломна, Московская обл., Российская Федерация, 140402, тел. +7(496)618-82-48, доб. 11-12, e-mail: volokhov-gm@vnikti.com

Эдуард Сергеевич Оганьян – доктор технических наук, главный научный сотрудник АО «ВНИКТИ», ул. Октябрьской революции, 410, г. Коломна, Московская обл., Российская Федерация, 140402, тел. +7(496)618-82-48, доб. 11-20, e-mail: vnikti15@yandex.ru

Гаджимет Исамединович Гаджиметов – руководитель испытательного центра АО «ВНИКТИ», ул. Октябрьской революции, 410, г. Коломна, Московская обл., Российская Федерация, 140402, тел. +7(496)618-06-07, e-mail: gajimetov-gi@vnikti.com

Дмитрий Александрович Князев – кандидат технических наук, заместитель заведующего отделом прочности АО «ВНИКТИ», ул. Октябрьской революции, 410, г. Коломна, Московская обл., Российская Федерация, 140402, тел. +7(496)618-82-48, доб. 15-77, e-mail: knyazev-da@vnikti.com

Виталий Владимирович Чунин – заведующий лабораторией колесных пар отдела прочности АО «ВНИКТИ», ул. Октябрьской революции, 410, г. Коломна, Московская обл., Российская Федерация,

140402, тел. +7(496)618-82-48, доб. 15-77, e-mail: chunin-vv@vnikti.com

Максим Владимирович Тимаков – заведующий лабораторией прочностных расчетов отдела прочности АО «ВНИКТИ», ул. Октябрьской революции, 410, г. Коломна, Московская обл., Российская Федерация, 140402, тел. +7(496)618-82-48, доб. 19-71, e-mail: timakov-mv@vnikti.com

Вклад авторов в статью

Волохов Г.М. – анализ нормативных документов в части подтверждения безопасности подвижного состава.

Оганьян Э.С. – анализ литературы по оценке ресурса элементов подвижного состава железных дорог.

Гаджиметов Г.И. – постановка задачи, анализ и выбор методических подходов проведения испытаний, анализ результатов и подготовка выводов.

Князев Д.А. – проведение стендовых испытаний на усталость осей и колес в составе колесной пары скоростного вагона-платформы.

Чунин В.В. – оценка напряженно-деформированного состояния и проведение расчетов на прочность.

Тимаков М.В. – проведение оценки ресурса и установление назначенного срока службы оси колесной пары.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

К оценке безопасности системы автоведения поездов

Игорь Б. Шубинский^{1*}, Хендрик Шебе², Ефим Н. Розенберг¹

¹АО «НИИАС», Москва, Российская Федерация

²TÜV Rheinland, Кельн, Германия

*igor-shubinsky@yandex.ru



Игорь Б.
Шубинский



Хендрик Шебе



Ефим Н.
Розенберг

Резюме. В статье рассмотрена система автоведения в составе системы управления и безопасности локомотива, средств центра слежения (контроля) бортовых и стационарных средств технического зрения. Сосредоточено внимание на зависимости безопасности и надежности этой системы от характеристик надежности составных элементов и влиянии возмущающих погодных воздействий. Сформулированы критерии опасного и защитного отказа системы, построены графовые модели состояний безопасности и надежности системы автоведения. Приведены предпосылки для применения графового Марковского метода расчета безопасности и надежности сложных систем. Это позволило определить такие ключевые показатели безопасности системы автоведения, как среднее время до опасного отказа, вероятность опасного отказа, интенсивность опасных отказов. В результате исследования установлено, что безопасность системы автоведения зависит, главным образом, от уровней надежности средств технического зрения. При этом рост интенсивности опасных отказов системы ограничен величиной половины интенсивности отказов средства технического зрения. Установлено также то, что надежность системы автоведения определяется интенсивностью отказов системы управления и безопасностью локомотива и интенсивностью отказов средств технического зрения.

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что для достижения приемлемого уровня безопасности системы автоведения следует сосредоточить усилия на дублировании средств технического зрения, достижении функциональной безопасности бортового и стационарного средств технического зрения на уровне SIL 4, а также на регулярном сравнении результатов бортового и стационарного средств технического зрения, дублировании результатов сравнения, сглаживании этих результатов в процессе движения локомотива. Кроме того, целесообразно парирование возмущающих погодных воздействий путем повышения эффективности машинного обучения программных средств технического зрения

Ключевые слова: система автоведения, техническое зрение, безопасность, надежность, Марковская модель, граф состояний, опасный отказ, защитный отказ.

Для цитирования: Шубинский И.Б., Шебе Х., Розенберг Е.Н. К оценке безопасности системы автоведения поездов // Надежность. 2021. №4. С 31-37. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-4-31-37>

Поступила 27.07.2021 г. / После доработки 16.11.2021 г. / К печати 14.12.2021 г.

Введение

Обеспечение безопасности сложной технической системы, обработка информации в которой осуществляется на уровне нейронных сетей, требует особых методов доказательства безопасности [1].

Главная проблема в разработке такого метода состоит именно в том, что вышеуказанная вычислительная система непостоянна в структуре алгоритма обработки информации, и к доказательству ее безопасности трудно применить классические методы вероятностной оценки в виде двух и более независимых аппаратно-программных обработчиков информации, применения разных программных продуктов в обработчиках и т.д. [2].

Именно поэтому дублирование таких обработчиков информации в виде камер технического зрения на локомотивах для безопасного определения препятствия на пути вряд ли получит требуемый уровень по безопасности, исходя из неизвестной величины времени тестирования такой самообучаемой, т.е. все время изменяемой, системы обработки ответственной информации.

В работе Брабанда и Шебе [1] предполагалось использовать статистические методы доказательства безопасности системы, а также обязательного наличия в структуре обрабатывающего комплекса дополнительного устройства, безопасность которого можно доказать традиционными способами за счет его неизменяемой структуры.

В работах Шубинского и Розенберга [3, 4] было предложено использовать так называемые многоуровневые структуры для доказательства безопасности, которые позволяют интегрировать безопасные и информационные системы с введением критерия обработки информации под требования безопасности. Данный подход хорошо себя зарекомендовал при разработке современных бортовых и стационарных систем безопасности. Также было использовано крайне важное свойство оценки безопасности системы – получение достоверной информации о предыстории состояния объекта с точки зрения безопасности.

Целесообразно применительно к задаче доказательства безопасности интеллектуальной системы с наличием нейронной сети применить принципы многоуровневой системы безопасности. Отличие при этом состоит в том, что нужно рассматривать не отдельный интеллектуальный прибор, например, камеру технического зрения на локомотиве, а весь комплекс технических средств в зоне движения локомотива.

Действительно, работа камеры на локомотиве с заранее созданной программой обработки информации о препятствии на пути зависит не только от принятых ранее мер по обучению нейронной сети, но и от конкретных факторов, влияющих на исправность аппаратных средств камеры, сбоев программного обеспечения и т.д. Кроме того, следует отметить, что влияние внешней среды – снег, туман, дождь – приводит к изменению показателей зоны обнаружения препятствия, что напрямую влияет на безопасность, т.к. связано с длиной тормозного пути поезда.

В данных условиях применяется дополнительный контроль за ситуацией впереди поезда из специального

диспетчерского центра, где за несколькими локомотивами наблюдает машинист-оператор [5].

Сложность этого метода состоит в том, что критическим звеном становится реакция машиниста-оператора, а он сам зависит от устойчивости видеоизображения камеры на борту и надежности средств широкополосной радиосвязи в данной точке.

С другой стороны, разделение процесса обработки информации на два подпроцесса – в виде внутренней интеллектуальной обработки информации на борту для принятия решения о свободности пути и в виде передачи исходной визуальной информации машинисту-оператору для принятия им решения – позволяет повысить безопасность. Критерием здесь является то, что бортовая система должна иметь большую вероятность ложной тревоги, а машинист-оператор может исправить эту ситуацию путем специальной команды, передаваемой по радиоканалу на локомотив. На практике без применения этого принципа беспилотные системы останавливались бы, например, из-за пластикового пакета на пути.

Следует отметить, что в состав комплекса входят и стационарные устройства, контролирующие свободность пути в местах с плохой видимостью [5]. Информация от этих стационарных систем передается на локомотив в режиме реального времени, что значительно повышает безопасность движения поездов. Таким образом, примененная модель является упрощенной, но она позволяет аналитически проанализировать проблему. В этом состоит превосходство данного подхода к построению модели исследования по сравнению с более сложными моделями. Интересной особенностью взаимодействия стационарных и локомотивных устройств технического зрения является то, что они в одинаковой ситуации состояния внешней среды могут видеть одни и те же объекты, в прямой их видимости или с различных, в том числе инверсных точек наблюдения.

Наличие объектов, определяемых двумя независимыми системами, позволяет использовать это свойство для взаимного контроля интеллектуальных технических средств, особенно для выработки корректного решения бортовыми интеллектуальными системами, которые работают в более тяжелых уровнях эксплуатации (скорость движения, ограничения по зоне видимости и т.д.). Результат сравнения объектов может быть сформирован в виде сравнения обработанных стационарными и подвижными камерами в виде заранее обработанных моделей изображения, а может содержать предполагаемую инверсию изображения одного и того же объекта, если на него осуществляется направление камер технического зрения с противоположных точек. Такое заранее сформированное свойство для системы безопасности сравнения результатов позволяет повысить уровень независимости при обработке информации. Каждое техническое средство, в том числе видеокamera, содержит элементы внутреннего тестирования как обязательный фактор при расчете уровня их безопасной работы. Учитывая, что в интеллектуальной системе при использовании нейронных систем трудно однозначно говорить о полноте тестирования, то целесообразно задействовать

фактор самодиагностики по заранее известным объектам наблюдения. Например, рядом с железнодорожными путями, в зоне сканирования камеры технического зрения или лидаров, находятся светофоры, шкафы управления, мачты электроснабжения и связи, которые четко привязаны к координатам пути, тем более если на локомотиве будет применяться 3D карта объектов инфраструктуры.

Таким образом, фиксация этих объектов позволяет фактически тестировать камеры и датчики на локомотиве с учетом параметров дистанции обнаружения и расшифровки видов объектов. Если частота контроля таких объектов достаточно высока, то на расстоянии движения локомотива между этими точками можно рассчитать вероятность отсутствия отказов или искажения алгоритма обработки информации на подвижном объекте. Достоинством этого метода является полнота обработки информации, когда совместно с внутренними тестированиями аппаратных средств можно добиться требуемого уровня безопасности системы. Сама система в этом случае представляется как «черный ящик», но с абсолютно известными выходными результатами в абсолютно известной координате пространства.

Концептуальная модель безопасности системы автоведения поездов

В составе системы автоведения локомотива содержатся следующие ключевые средства:

- средства системы управления и безопасности локомотива;
- технические средства центра слежения (контроля);
- стационарные средства «технического зрения»;
- бортовые средства «технического зрения».

Концептуальная модель безопасности системы автоведения локомотива содержит описание состояний надежности и безопасности составных средств системы, их взаимосвязи, а также влияние возмущающих погодных воздействий. Эта модель представлена в виде графа состояний безопасности системы (рис. 1).

При построении модели безопасности системы принят следующий критерий ее **опасного отказа**: отказ всех средств «технического зрения» и центра слежения (контроля) или необнаруженный отказ системы управления и безопасности локомотива. Критерий **защитного отказа**: отказ стационарных средств технического зрения, центра слежения (контроля) и влияние возмущающих погодных воздействий или обнаруженный отказ системы управления и безопасности локомотива.

Все множество состояний системы, согласно графу состояний на рис. 1, разделяется на следующие подмножества:

- подмножество работоспособных состояний $S_p = \{0, 2, 3, 4, 5\}$;
- подмножество защитных состояний $S_z = \{1, 8\}$;
- подмножество опасных состояний $S_o = \{6, 7\}$.

Работоспособные и защитные состояния образуют множество исправных состояний.

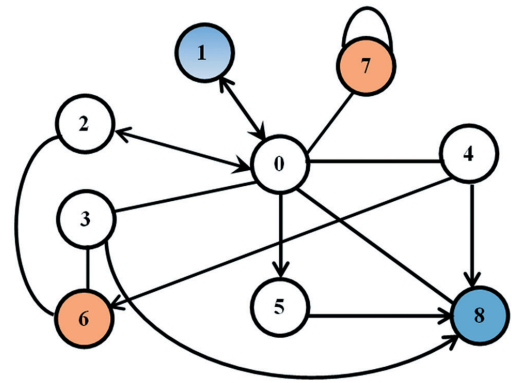


Рис. 1. Граф состояний безопасности системы автоведения поездов

Состояния графа: 0 – исправное состояние, возмущающих погодных воздействий нет; 1 – обнаруженный отказ системы управления и безопасности локомотива – **защитный отказ**; 2 – отказ технических средств центра слежения (контроля); 3 – отказ стационарных средств технического зрения; 4 – отказ бортовых средств технического зрения; 5 – возмущающие погодные воздействия; 6 – отказ всех средств «технического зрения» и центра слежения (контроля) – **опасный отказ** системы автоведения; 7 – необнаруженный отказ системы управления и безопасности локомотива – **опасный отказ**; 8 – отказ стационарных средств технического зрения, центра слежения (контроля) и возмущающие погодные воздействия – **защитный отказ**.

Переходы в модели в исправных состояниях, требующие пояснения: 1-0, 2-0, 3-0, 8-0 – восстановления технических средств после их отказов; 3-8 – отказ средств центра слежения при условии отказа стационарных средств «технического зрения»; 4-8 – отказ средств центра слежения при условии отказа бортовых средств «технического зрения»; 7-8 – отказ стационарных средств «технического зрения» при условии возмущающих погодных воздействий.

При математическом описании модели будем исходить из следующих соображений. Система новая, еще не имеет аналогов, статистических данных о ней нет. Поэтому законы распределения случайных величин в системе не установлены. Исходя из имеющегося опыта в отношении систем управления на железнодорожном транспорте, можно с большой долей уверенности предположить, что отказы электронных устройств, таких как устройства системы управления и безопасности локомотива, технических средств центра слежения (контроля) и средств технического зрения, распределены по экспоненциальному закону. Эта предпосылка не распространяется на случайные величины времени восстановления устройств после отказов и, тем более, на случайные погодные возмущающие воздействия. Проблема возмущающих воздействий теоретически исследована в работах Шебе и Фиртла [6], эти модели также применимы к возмущающим погодным воздействиям. Чтобы обеспечить адекватность результатов, авторы вынуждены были применить

сложное математическое описание случайного процесса возмущающих воздействий на систему управления движением локомотива. Эти обстоятельства затрудняют их практическое использование в математическом моделировании безопасности системы автоведения.

При отсутствии практических сведений весьма проблематично строить прогнозы относительно количественных значений показателей безопасности системы автоведения. В данной работе мы стремимся в условиях большой неопределенности выявить наиболее существенные факторы, влияющие на безопасность системы. Этой цели соответствует применение предпосылки о простейших потоках случайных событий в системе автоведения. Простейшие потоки отличаются свойствами ординарности, стационарности и отсутствия последействия. Их применение вследствие большой неопределенности исходных условий, с одной стороны, не способствуют точности прогнозирования характеристик безопасности поведения системы. С другой стороны, полученные при этом выходные результаты можно расценивать в качестве гарантированных снизу предпосылок (как наихудший случай) к построению безопасной системы автоведения путем нейтрализации выявленных наиболее значимых негативных факторов. Таким образом, примененная модель является упрощенной, но она позволяет выполнить анализ проблемы. Это – превосходство данного подхода по сравнению с более сложными моделями.

Основываясь на приведенных предпосылках, прием экспоненциальными распределения отказов $F_i(t)$ и восстановления $Q_i(t)$ составных технических средств:

$$F_i(t) = 1 - \exp(-\lambda_i t), \quad i = 1 \dots 4; \quad Q_i(t) = 1 - \exp(-\mu_i t),$$

где λ_1 – интенсивность отказов системы управления и безопасности локомотива; λ_2 – интенсивность отказов средств центра слежения (контроля); λ_3 – интенсивность отказов стационарных средств технического зрения; λ_4 – интенсивность отказов бортовых средств технического зрения; μ_1 – интенсивность восстановления отказов системы управления и безопасности локомотива; μ_2 – интенсивность восстановления отказов средств центра слежения (контроля); μ_3 – интенсивность восстановления отказов бортовых средств технического зрения; μ_4 – интенсивность восстановления отказов стационарных средств технического зрения и средств центра слежения (контроля).

Предполагается, что отказ системы управления и безопасности локомотива обнаруживается с вероятностью правильного обнаружения α . Вероятность пропуска отказа системы локомотива есть $\bar{\alpha} = 1 - \alpha$. Вероятность ложного обнаружения ничтожно мала.

Исходя из указанных выше предпосылок, примем закон распределения случайных погодных возмущающих воздействий в виде $H(t) = 1 - \exp(-\gamma t)$, где γ – интенсивность их влияния на безопасность системы автоведения.

При приведенных предпосылках поведение системы автоведения в отношении ее безопасности представляется Марковским случайным процессом.

С этой целью находим входные параметры модели безопасности системы в подмножествах исправных (рабочеспособных и защитных) состояний согласно графу на рис. 1.

Функции распределения безусловного времени пребывания системы, представленной графом состояний на рис. 1, в исправных состояниях имеют следующие выражения:

$$\begin{aligned} F_0(t) &= 1 - \exp\left(-\left[\gamma + \sum_{i=1}^4 \lambda_i\right] \cdot t\right); \quad F_1(t) = 1 - \exp(-\mu_1 t); \\ F_2(t) &= 1 - \exp(-[\lambda_3 + \mu_2] \cdot t); \quad F_3(t) = 1 - \exp(-[\lambda_2 + \lambda_4 + \mu_3] \cdot t); \\ F_4(t) &= 1 - \exp(-[\gamma + \lambda_2] \cdot t); \\ F_5(t) &= 1 - \exp(-\lambda_4 t); \quad F_8(t) = 1 - \exp(-\mu_4 t). \end{aligned} \quad (1)$$

Опасные состояния 6 и 7, а также входящие в эти состояния дуги, исключены из математического описания, поскольку исследуется процесс поведения системы автоведения до попадания в опасные состояния.

Математические ожидания времени пребывания системы в исправных состояниях:

$$\begin{aligned} T_0 &= \int_0^{\infty} (1 - F_0(t)) dt = \frac{1}{\gamma + \sum_{i=1}^4 \lambda_i}; \quad T_1 = \int_0^{\infty} e^{-\mu_1 t} dt = \frac{1}{\mu_1}; \\ T_2 &= \int_0^{\infty} e^{-\lambda_3 t} e^{-\mu_2 t} dt = \frac{1}{\lambda_3 + \mu_2}; \\ T_3 &= \int_0^{\infty} e^{-\lambda_2 t} \cdot e^{-\lambda_4 t} \cdot e^{-\mu_3 t} dt = \frac{1}{\lambda_2 + \lambda_4 + \mu_3}; \\ T_4 &= \int_0^{\infty} e^{-\gamma t} e^{-\lambda_2 t} dt = \frac{1}{\gamma + \lambda_2}; \\ T_5 &= \int_0^{\infty} e^{-\lambda_4 t} dt = \frac{1}{\lambda_4}; \quad T_8 = \int_0^{\infty} e^{-\mu_4 t} dt = \frac{1}{\mu_4}. \end{aligned} \quad (2)$$

Вероятности переходов между состояниями i, j системы определяются по формуле $p_{ij} = \int_0^{\infty} \lambda_{ij} [1 - F_i(t)] dt$, где λ_{ij} – интенсивность перехода системы из состояния i в состояние j . Например, интенсивность перехода из начального состояния 0 в состояние 1 (рис. 1) обнаруженного отказа системы управления и безопасности локомотива равна $\lambda_{01} = \alpha \cdot \lambda_1$, тогда как интенсивность перехода из состояния 0 в состояние 7 необнаруженного отказа этой системы (опасный отказ системы) вычисляется как $\lambda_{07} = \bar{\alpha} \cdot \lambda_1$.

Таким образом,

$$\begin{aligned} p_{01} &= \frac{\alpha \lambda_1}{\gamma + \sum_{j=1}^4 \lambda_j}; \quad p_{0i} = \frac{\lambda_i}{\gamma + \sum_{j=1}^4 \lambda_j}, \quad i = 2, 3, 4; \\ p_{05} &= \frac{\gamma}{\gamma + \sum_{j=1}^4 \lambda_j}; \quad p_{10} = p_{58} = p_{80} = 1; \quad p_{20} = \frac{\mu_2}{\lambda_3 + \mu_2}; \\ p_{30} &= \frac{\mu_3}{\lambda_2 + \lambda_4 + \mu_3}; \quad p_{38} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 + \lambda_4 + \mu_3}; \quad p_{48} = \frac{\gamma}{\lambda_2 + \gamma}. \end{aligned} \quad (3)$$

Результаты анализа показателей безопасности системы автоведения поездов

Используя графовый Марковский метод расчета безопасности сложных систем Шубинского [7], можно определить такие ключевые показатели безопасности системы автоведения, как среднее время до опасного отказа $T_{\text{оп}}$, вероятность опасного отказа $G_{\text{оп}}(t)$, интенсивность опасных отказов $\lambda_{\text{оп}}$.

Ключевой показатель безопасности – среднюю наработку до опасного отказа $T_{\text{оп}}$ системы определяют с помощью метода [8] по формуле

$$T_{\text{оп}} = \frac{T_1 \Delta G_{S_{\text{оп}}}^1 + \sum_{(k)} \sum_{i,j} l_k^{ij} \Delta G_k^j T_j}{\Delta G_{S_{\text{оп}}}}, \quad (4)$$

где $\Delta G_{S_{\text{оп}}}^1$ – вес разложения графа без начальной вершины 1 и множества опасных состояний $S_{\text{оп}} = \{6, 7\}$ и связанных с ними дуг графа; $\Delta G_{S_{\text{оп}}}$ – вес разложения графа без множества опасных состояний и связанных с ними дуг графа; l_k^{ij} – вес k -го пути из вершины i в вершину j ; ΔG_k^j – вес разложения графа без вершин, расположенных на k -ом пути и без вершины j в множестве неопасных состояний $S_{\text{н}} = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 8\}$.

Веса разложений можно определить с помощью формулы Мейсона [8]

$$\Delta G = 1 - \sum_i C_i + \sum_{ij} C_i C_j - \sum_{ijk} C_i C_j C_k + \dots$$

где веса контуров находят в множестве неопасных состояний (рис. 1)

$$C_1 = p_{01} \cdot p_{10}; C_2 = p_{02} \cdot p_{20}; C_3 = p_{03} \cdot p_{30}; C_4 = p_{03} \cdot p_{38} \cdot p_{80}; \\ C_5 = p_{04} \cdot p_{48} \cdot p_{80}; C_6 = p_{05} \cdot p_{58} \cdot p_{80}. \quad (5)$$

Все контуры пересекающиеся, т.к. имеют общую вершину 0.

Руководствуясь графом на рис. 1 и подставляя выражения (1), (2), (3) в формулу (4), находим в множестве неопасных состояний $S_{\text{н}} = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 8\}$

$$T_{\text{оп}} = \frac{T_0 + \sum_{i=1}^5 p_{0i} T_i + (p_{03} p_{38} + p_{04} p_{48} + p_{05} p_{58}) \cdot T_8}{\Delta G_{S_{\text{оп}}}}, \quad (6)$$

где вес разложения графа без опасных состояний $\Delta G_{S_{\text{оп}}} = 1 - \sum_{i=1}^6 C_i$ и веса контуров вычисляются по формуле (5).

Поскольку в реальных системах управления между интенсивностями восстановлений и отказов электронных средств имеет место соотношение $\lambda_i \ll \mu_i$, то с погрешностью, не превышающей первого порядка малости, можно существенно упростить формульные выражения исходных параметров модели. При этом следует принять во внимание, что интенсивность восстановления стационарных электронных средств, таких как центр слежения (контроля) и технического зрения, практически одинаковы, а некоторые отклонения в пределах

десятков процентов неощутимо влияют на конечные результаты в условиях отмеченного выше соотношения между интенсивностями отказов и восстановлений. Тогда $\mu_2 = \mu_4 = \mu$ и $\mu_1 = \mu_3 = k\mu$, ($0 < k \leq 1$), где k – коэффициент учета логистических задержек в восстановлении отказов бортовых средств системы автоведения.

Указанные изменения в исходных параметрах касаются функций распределения $F_1(t) \equiv 1 - \exp(-k\mu \cdot t)$, $F_2(t) \equiv 1 - \exp(-\mu \cdot t)$, $F_3(t) \equiv 1 - \exp(-k\mu \cdot t)$, математических ожиданий $T_2 \equiv \frac{1}{\mu}$ и $T_1 \equiv T_3 \equiv \frac{1}{k\mu}$, вероятностей переходов $p_{20} \equiv p_{30} \equiv 1$, $p_{38} \equiv \frac{\lambda_2}{k\mu}$.

Действительно, по требованиям нормативного документа, NPRD-2011 camera sub-assembly [9] интенсивность отказов средств технического зрения должна составлять $\lambda_2 = \lambda_4 = 2,3 \cdot 10^{-5}$, а центра слежения (контроля) $\lambda_3 = 2,8 \cdot 10^{-5}$. Согласно EN 50129 [10] интенсивность отказов системы управления и безопасности локомотива должна соответствовать уровню SIL 4, т.е. $\lambda_1 \leq 10^{-8}$. При этом согласно IEC 61508-2 (A4, первая строка) [12] вероятность пропуска отказа должна быть меньше уровня $\bar{\alpha} \leq 0,01$. Интенсивность восстановления отказов электронных программируемых средств системы автоведения в большинстве случаев превышает значение $\mu \geq 2$, что превышает интенсивности отказов на 4 и более порядков. Это позволяет в пределах приемлемой погрешности исключить из формульного выражения те составляющие суммирования, которые на несколько порядков меньше других членов этих сумм.

Указанные соображения позволяют раскрыть формульное выражение (6) среднего времени до опасного отказа системы автоведения до приемлемого прикладного математического выражения

$$T_{\text{оп}} = \frac{\frac{k\mu + \alpha\lambda_1 + \lambda_3 + k(\lambda_2 + \lambda_4)}{\left(\gamma + \sum_{i=1}^4 \lambda_i\right) k\mu} + \frac{\gamma}{\left(\gamma + \sum_{i=1}^4 \lambda_i\right) \lambda_4} + \left[\frac{\lambda_3 \cdot \lambda_2}{\left(\gamma + \sum_{i=1}^4 \lambda_i\right) k\mu} + \frac{\lambda_4 \cdot \gamma}{\left(\gamma + \sum_{i=1}^4 \lambda_i\right) (\lambda_2 + \gamma)} + \frac{\gamma}{\left(\gamma + \sum_{i=1}^4 \lambda_i\right)} \right] \cdot \frac{1}{\mu}}{\Delta G_{S_{\text{оп}}}},$$

где

$$\Delta G_{S_{\text{оп}}} = 1 - p_{01} p_{10} - p_{02} p_{20} - p_{03} p_{30} - p_{03} p_{38} p_{80} - p_{04} p_{48} p_{80} - p_{05} p_{58} p_{80} \equiv 1 - \frac{\alpha\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \gamma}{\left(\gamma + \sum_{i=1}^4 \lambda_i\right)} - \frac{\lambda_3}{\left(\gamma + \sum_{i=1}^4 \lambda_i\right)} \frac{\gamma}{(\gamma + \lambda_2)} - \frac{\lambda_4}{\left(\gamma + \sum_{i=1}^4 \lambda_i\right)} \frac{\lambda_2}{k\mu}. \quad (7)$$

После преобразования формулы (7) находим, что с погрешностью, не превышающей первого порядка малости, среднее время до опасного отказа системы автоведения может быть представлено в виде

$$T_{оп} \cong \frac{\lambda_4(\gamma + \lambda_2 + \lambda_4) + \gamma \cdot (\gamma + \lambda_2)}{\lambda_4(\alpha \cdot \lambda_1 + \lambda_4)(\gamma + \lambda_2)}, \quad (8)$$

Предельное значение наработки системы автоведения поезда до опасного отказа имеет место при отсутствии деструктивных возмущающих погодных условий ($\gamma \rightarrow 0$) и при выполнении требований ИЕС 61508-2 [11] ($\alpha \rightarrow 0$). Подставляя эти значения в формулу (8), получаем результат математического моделирования. Он свидетельствует о том, что безопасность системы автоведения зависит, главным образом, от уровней надежности средств технического зрения, т.е.

$$T_{пред} \leq \frac{\lambda_2 + \lambda_4}{\lambda_2 \lambda_4} = \frac{1}{\lambda_4} + \frac{1}{\lambda_2}.$$

При близких значениях интенсивности отказов стационарных и бортовых средств технического зрения данное выражение преобразуется к виду

$$\lambda_2 \cong \lambda_4 = \lambda; \text{ следовательно } T_{пред} \leq \frac{2\lambda}{\lambda^2} = 2 \cdot T,$$

где T – среднее время до отказа средства технического зрения.

Так как поток опасных отказов системы многократно разрежен относительно потока неопасных отказов исходного объекта, который является простейшим, то согласно работам [12, 13] многократно разреженный случайным образом простейший поток отказов также является простейшим с постоянным параметром

$$\lambda_{оп} = 1/T_{оп} = \frac{\lambda_4(\alpha \cdot \lambda_1 + \lambda_4)(\gamma + \lambda_2)}{\lambda_4(\gamma + \lambda_2 + \lambda_4) + \gamma(\gamma + \lambda_2)}. \quad (9)$$

В пределе интенсивность опасных отказов системы автоведения стремится к величине

$$\lambda_{оп} \rightarrow \frac{\lambda_2 \cdot \lambda_4}{\lambda_2 + \lambda_4} \cong \frac{\lambda}{2} (\lambda_2 \cong \lambda_4), \quad (10)$$

то есть, к половине величины интенсивности отказов средства технического зрения.

Вероятность опасного отказа с погрешностью, не превышающей первого порядка малости, определяется в виде

$$G_{оп}(t) \cong \lambda_{оп} \cdot t \rightarrow \frac{\lambda}{2} t.$$

Результаты анализа показателей надежности системы автоведения поездов

Модель надежности системы автоведения трансформируется из концептуальной модели безопасности этой системы (рис. 1) путем исключения из нее опасных состояний и связанных с ними дуг. Граф состояний модели надежности приведен на рис. 2.

Для решения задачи анализа надежности данной системы ограничимся определением среднего времени

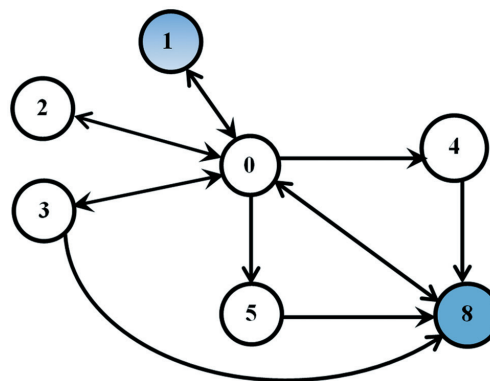


Рис. 2. Граф состояний надежности системы автоведения поездов

ее пребывания в множестве работоспособных состояний $S_p = \{0, 2, 3, 4, 5\}$. Этот показатель есть не что иное, как средняя наработка системы до защитного отказа. Целесообразность анализа именно этого показателя обусловлена тем, что для повышения безопасности стремятся в каждом тревожном случае переводить систему в защитное (нерабочее) состояние. Поэтому важно установить, какие факторы оказывают определяющее влияние на надежность системы с техническим зрением при построении ее с данной архитектурой.

Руководствуясь графом на рис. 2, с помощью метода [7] находим

$$T_3 = \frac{T_0 + p_{02}T_2 + p_{03}T_3 + p_{04}T_4 + p_{05}T_5}{1 - p_{02}p_{20} - p_{03}p_{30}}.$$

При принятых в пп. 2 и 3 предпосылках и допущениях данное выражение представляется в виде

$$T_3 = \frac{(\lambda_2 + \gamma)(\lambda_4 + \gamma) + \lambda_4^2}{\lambda_4(\lambda_2 + \gamma)(\lambda_1 + \lambda_4 + \gamma)} + \frac{\lambda_2\mu_3 + \lambda_3\mu_2}{\mu_2\mu_3(\lambda_1 + \lambda_2 + \gamma)}. \quad (11)$$

Как отмечалось ранее в п. 2, согласно нормативным требованиям документа NPRD-2011 camera sub-assembly [9] интенсивность отказов средств технического зрения должна составлять $\lambda_2 = \lambda_4 = 2,3 \cdot 10^{-5}$, а центра слежения (контроля) – $\lambda_3 = 2,8 \cdot 10^{-5}$. Следовательно, с приемлемой для оценки точностью можно принять, что $\lambda_2 \cong \lambda_3 \cong \lambda_4 = \lambda$. Кроме того, средства технического зрения и центра слежения в подавляющем большинстве содержат электронные средства, интенсивность восстановления которых находится примерно на одинаковом уровне $\mu \geq 2$. Следовательно, можно принять, что $\mu_2 \cong \mu_3 = \mu$ и выражение (11) преобразуется к виду

$$T_3 = \frac{(\lambda + \gamma)^2 + \lambda_4^2}{\lambda(\lambda + \gamma)(\lambda_1 + \lambda + \gamma)} + \frac{2\lambda}{\mu(\lambda_1 + \lambda + \gamma)}. \quad (12)$$

Как и при оценке безопасности системы, примем что предельное значение наработки системы автоведения поезда до защитного отказа имеет место при отсутствии деструктивных возмущающих погодных условий ($\gamma \rightarrow 0$). Тогда формула (12) примет следующий вид:

$$T_3 \rightarrow \frac{2}{\lambda_1 + \lambda} \left(1 + \frac{\lambda}{\mu} \right).$$

Как отмечалось в п. 2, в данной задаче имеет место условие $1 \gg \frac{\lambda}{\mu}$. Учитывая это, находим предельную оценку надежности системы автоведения поездов по критерию средней наработки до защитного отказа

$$T_3 \rightarrow \frac{2}{\lambda_1 + \lambda}. \quad (13)$$

Следовательно, надежность системы автоведения определяется интенсивностью отказов системы управления и безопасности локомотива (λ_1) и средств технического зрения (λ). Именно эти объекты системы автоведения должны быть в центре внимания при обеспечении приемлемого уровня надежности системы.

5. Заключение

Проведенный анализ позволяет сделать вывод, что для достижения приемлемого уровня безопасности системы автоведения следует сосредоточить усилия на следующем:

- дублирование средств технического зрения;
- достижение функциональной безопасности бортового и стационарного средств технического зрения на уровне SIL 4 (двухканальность и двухверсионность программного обеспечения, исполнение независимых каналов и др.);
- регулярное сравнение результатов бортового и стационарного средств технического зрения, дублирование результатов сравнения, сглаживание этих результатов в процессе движения локомотива.

При этом необходимо обеспечить выполнение требований стандарта EN 50129 к функциональной безопасности системы управления и безопасности локомотива на уровне SIL 4. Кроме того, целесообразно парирование возмущающих погодных воздействий путем повышения эффективности машинного обучения программных средств технического зрения.

Исследование подтвердило то обстоятельство, что безотказность системы управления и безопасности локомотива оказывает решающее влияние на надежность системы автоведения.

Библиографический список

1. Брабанд Й., Шебе Х. Оценка безопасности искусственного интеллекта // Надежность. 2020. Т. 19. № 4. С. 25-34.
2. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Христов Х.А., Гавзов Д.В. Методы построения безопасных микроэлектронных систем железнодорожной автоматики / Под ред.: Сапожникова Вл.В. М.: Транспорт, 1995. 272 с.
3. Шубинский И.Б. Надежные отказоустойчивые информационные системы. Методы синтеза. М.: Журнал Надежность, 2017. 544 с.
4. Розенберг Е.Н. Многоуровневая система управления и обеспечения безопасности движения поездов: дис. ... д-ра техн. наук. Моск. гос. ун-т путей сообщения (МИИТ), Москва, 2004.
5. Патент 2742960. Российская Федерация, МПК B61L 25/02. Бортовая информационная система: № 2020131633: заявл. 25.09.2020: опубл. 12.02.2021 Бюл. № 5 / Мыльников П.Д., Охотников А.П., Попов П.А.

6. Schäbe H., Viertl R. An Axiomatic Approach to Models of Accelerated Life Testing // Eng. Fract. Mechanics. 1995. Vol. 50. No. 2. P. 203-217.

7. Шубинский И.Б. Структурная надежность информационных систем. Методы анализа. М.: Журнал Надежность, 2012. 212 с.

8. Mason S.J. Feedback Theory – Further Properties of Signal Flow Graphs // Proceedings of the IRE. 44: 920–926. doi:10.1109/jrproc.1956.275147

9. NPRD-2011 Nonelectronics Parts Reliability Data. Utica, N.Y.: Reliability Information Analysis Center, 2011.

10. EN 50129 Railway applications – Communication, signalling and processing system – Safety related electronic systems for signalling, 2018.

11. IEC 61508, Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems, Parts 1-7, 2011;

12. Григелионис Б.И. О точности приближения композиции процессов восстановления пуассоновским процессом // Литов. матем. сб. 1962. Т. 2. № 2. С. 135-143.

13. Назаров А.А., Лопатин И.Л. Асимптотические пуассоновские МАР-поток // Известия Томского государственного университета (Управление, вычислительная техника и информатика). 2010. № 4(13). С. 72-78.

Сведения об авторах

Игорь Борисович Шубинский – доктор технических наук, профессор, заместитель руководителя НТК АО «НИИАС», ул. Нижегородская, д. 27, стр.1, Москва, Российская Федерация, 109029, тел. +7 (495) 786-68-57, e-mail: igor-shubinsky@yandex.ru

Хендрик Шебе – доктор физико-математических наук, заведующий отделом анализа рисков и опасностей, TÜV Rheinland InterTraffic, Кельн, Германия, e-mail: schaebe@de.tuv.com

Ефим Наумович Розенберг – доктор технических наук, профессор, первый заместитель Генерального директора АО «НИИАС», ул. Нижегородская, д. 27, стр.1, Москва, Российская Федерация, 109029, e-mail: info@vniias.ru

Вклад авторов в статью

Шубинский И.Б. – разработка и решение моделей безопасности и надежности системы автоведения, анализ результатов.

Шебе Х. – анализ публикаций в области безопасности систем автоведения поездов, подготовка экспериментальных данных, участие в разработке моделей безопасности и надежности системы автоведения и анализе полученных результатов исследования.

Розенберг Е.Н. – постановка задачи исследования, участие в разработке модели безопасности системы автоведения, участие в анализе результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поддержка принятия решения по профилактике нарушений безопасности в работе

Максим А. Кулагин^{1, 2*}, Валентина Г. Сидоренко^{1, 2}

¹ПУТ(МИИТ), Москва, Российская Федерация, ²Sirius University of Science and Technology, Sochi, Russia

*maksimkulagin06@yandex.ru



Максим А. Кулагин



Валентина Г. Сидоренко

Резюме. Цель. Целью работы является рассмотрение опыта снижения влияния человеческого фактора на ход технологических процессов, разработка структуры и математического обеспечения системы поддержки принятия решений по профилактике нарушений безопасности в работе машиниста с использованием методов машинного обучения, анализ полученных результатов. **Методы.** В исследовании, представленном в статье, используются методы машинного обучения, статистического анализа и экспертного анализа. В части методов машинного обучения использовались: логистическая регрессия, случайные леса, градиентный бустинг над решающими деревьями при частотном представлении категориальных признаков, нейронные сети. **Результаты.** Сформировано множество характеризующих работу машиниста показателей, которые используются в создаваемой системе. Сформулирован термин «надежность машиниста», как способность не совершать нарушения безопасности движения в течение определенного количества поездок. Реализованы и исследованы алгоритмы прогнозирования нарушений в работе машинистов, используемые для формирования групп надежности и перечня профилактических мероприятий, рекомендуемых для снижения числа нарушений безопасности в работе машиниста. В качестве меток для задачи прогнозирования нарушений безопасности были выбраны грубые нарушения с установленной виной машиниста, которые могут быть совершены в ближайшие 3, 7, 10, 20, 30, 60 дней. Анализ результатов на тестовой выборке позволил выявить, что модель, основанная на градиентном бустинге над решающими деревьями при частотном представлении категориальных признаков, показывает лучшие результаты для задачи бинарной классификации на горизонте прогнозирования 30 и 60 дней. Разработанный алгоритм дал верный прогноз: в 76% случаях при пороге 0,7 и горизонте 30 дней; в 82% случаях при пороге 0,9 и горизонте 60 дней. Перспективным направлением решения поставленной задачи является интеграция различных подходов к прогнозированию возникновения нарушений безопасности в работе машиниста. В качестве дополнительных результатов с помощью лучшей из рассмотренных модели градиентного бустинга над решающими деревьями при частотном представлении категориальных признаков определены 10 наиболее значимых показателей работы машинистов. **Заключение.** Представлен обзор методов и систем оценки надежности человека и влияния человеческого фактора на безопасность транспортных систем, позволивший выбрать перспективные направления и методы решения задач прогнозного анализа работы машиниста, к которым относятся методы машинного обучения. Сформированное множество показателей работы машиниста, учитывающих динамику изменения качества работы машиниста в прошлом, позволило получить исходные данные для обучения моделей, реализованных в рамках создаваемой системы. Реализованные модели позволили агрегировать информацию о машинистах для принятия точечных и временных профилактических мероприятий, рекомендуемых для повышения надежности машиниста. Сформулированный подход по формированию профилактических мероприятий внедрен в трех депо ОАО «РЖД» в режиме опытной эксплуатации.

Ключевые слова: интеллектуальное управление, рекомендательные системы, система поддержки принятия решений, машинное обучение, градиентный бустинг, человеческий фактор, машинист, транспортная система.

Для цитирования: Кулагин М.А., Сидоренко В.Г. Поддержка принятия решения по профилактике нарушений безопасности в работе // Надежность. 2021. № 4. С 38-46. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-4-38-46>

Поступила 16.09.2021 г. / После доработки 30.10.2021 г. / К печати 14.12.2021 г.

Введение

Одним из предметов исследования в области анализа влияния человеческого фактора в системе «человек-машина» является проблема ошибок человека в процессе деятельности и возможность прогнозирования этих ошибок. В настоящее время деятельность машинистов не имеет объективной системы оценки. Учет и определение значимости показателей, которые характеризуют качество работы машиниста, зависят в основном от закрепленного над ним руководителя, то есть наблюдается присутствие влияния человеческого фактора. Поэтому целесообразно разработать систему поддержки принятия решения (СППР) по профилактике нарушений безопасности в работе машиниста, которая позволит дать объективную оценку деятельности машиниста путем прогнозирования возможных нарушений и формирования перечня профилактических мероприятий, рекомендуемых для повышения надежности машиниста.

Введем понятие «надежность машиниста», которую будем определять, как способность не совершать нарушений безопасности движения в течение R поездок, $R \geq 1$. При этом под нарушением безопасности движения понимается множество инцидентов, приводящих к нарушению пунктов действующего в ОАО «РЖД» классификатора нарушений и нештатных ситуаций. Это множество формируется по результатам расшифровки скоростемерных лент, регистрируемых в сетевой информационно-сигнальной системе учета, анализа и расследования нарушений безопасности движения [1]. Вероятность отсутствия нарушений безопасности движения вычисляется через вероятность противоположного события:

$$P(R) = 1 - P_N(R), \quad (1)$$

где $P_N(R)$ – вероятность нарушения безопасности движения в течение R поездок. Определение этой величины требует знаний о корреляционной зависимости между показателями машиниста и совершаемыми нарушениями.

Понятие структурной и функциональной надежности детально рассматривается в работах [2, 3]. В рамках данного исследования логично опираться на понятие функциональной надежности, определяемой как готовность машиниста к выполнению предусмотренных для него задач в течение R поездок. Задачи можно сформулировать, как:

- обеспечивать выполнение графика движения поездов;
- выполнять установленные технологии вождения поездов и производства маневровых работ;
- при вождении пассажирских поездов обеспечивать качественное обслуживание пассажиров, не допуская нарушений плавности ведения поезда, режима электроотопления и вентиляции вагонов, порядка посадки и высадки пассажиров.

1. Обзор источников

Несмотря на значительное развитие автоматизированных систем управления (АСУ), исключить полно-

стью участие человека в производственных процессах невозможно. Анализ надежности человека (АНЧ) – это относительно новое дисциплинарное направление. Методы АНЧ применяются во многих отраслях. Данные методы направлены на оценку надежности человека и человеческого фактора, влияющего на АСУ. Научное сообщество за последние годы разработало несколько методологий АНЧ [4, 5, 6]. Разработанные методологии можно разделить на две макрокатегории: методы первого и второго поколения.

Методы первого поколения включают 35-40 методов обеспечения надежности человека, многие из которых являются модификацией одного метода. Теоретической базой, которая объединяет большинство методов первого поколения, является: метод классификации ошибок в соответствии с понятием «бездействие»; определение «факторов, влияющих на производительность»; когнитивная модель (основанная на навыках, правилах и знаниях). Наиболее популярной в первом поколении теорией для определения и классификации неправильных действий является метод классификации ошибок в соответствии с концепцией, рассмотренной в [7] и основанной на принципе «действие-бездействие». «Бездействие» в рамках данных принципов определяет действие, которое не выполнено или выполнено с опозданием. «Действие» – это выполнение человеком действия, которое не требуется для процесса. На основе этого принципа разработаны модели прогнозирования первого поколения. Самой популярной из них стала модель *THERP* [8]. Это методика по формированию прогноза ошибки человека на основе частоты ошибок этого же человека в прошлом. Данная методика была разработана для атомной электростанции с целью проведения вероятностной оценки риска. С помощью данной методики авторы количественно определяли вероятность человеческой ошибки.

Методы второго поколения, термин, впервые сформулированный в [8, 9, 10], были разработаны с целью преодолеть ограничения методов первого поколения. В основе данных методов использованы модели ментальных процессов, предоставленные когнитивной психологией. Эти методы расширили способы описания ошибок за пределами обычной бинарной классификации. Рассмотрены динамические аспекты взаимодействия человека с машиной и их использование в качестве основы для разработки тренажеров операторской деятельности.

Затрагиваемая в статье тема связана с безопасностью движения на железнодорожном транспорте, обеспечение которой является одной из ключевых задач для ОАО «РЖД». Существует множество работ, посвященных различным аспектам безопасности. Рассмотрим некоторые примеры [11, 12, 13, 14]. Безопасность на железнодорожном транспорте в части управления и контроля поведения машиниста обеспечивается с использованием различных средств. Для повышения безопасности движения на подвижном составе реализована комплексная система, в состав которой входят:

- универсальная система автоведения поезда (УСАВП) [15];
- система автоматического управления тормозами (САУТ-ЦМ) [16];
- комплексное локомотивное устройство безопасности (КЛУБ-У) [17];
- телемеханическая система контроля бодрствования машиниста (ТСКБМ) [18];
- рукоятка бдительности машиниста (РБМ) [19].

Кроме систем управления безопасностью через косвенное управление и ограничения поведения машиниста существуют методы оценки личностных характеристик машинистов, методики, предназначенные для применения в рамках психологического сопровождения профессиональной деятельности машинистов. По результатам применения этих методик составлено развернутое описание мотивационно-личностных качеств, характеризующих выборку машинистов, а также проанализирована взаимосвязь выделенных характеристик с уровнем аварийности в их поездной деятельности [20].

Среди работ по оценке человеческой деятельности на железной дороге можно выделить работу [21]. В ней автор опирается на методы экспертных оценок, используемые для определения коэффициентов значимостей показателей, производит оценку рисков возникновения потенциальных, вызванных влиянием человеческого

фактора несоответствий в технологических процессах работы железнодорожных станций. В результате работы выявлено, что основной причиной (50–75% от общего числа причин) инцидентов на железнодорожном транспорте являются ошибочные действия технического персонала.

Построение рейтинга работы машинистов уже проводилось в ОАО «РЖД» [22]. В качестве основы алгоритма использовался сбор и анализ мнений экспертов. Эксперты отбирали признаки и проставляли их значимости. В качестве математического аппарата использована классическая линейная комбинация вектора признаков и вектора весов, которая нормировалась по количеству поездок, совершенных машинистом в течение месяца. Заметное ограничение метода заключается в субъективности мнений экспертов, что может повлечь за собой смещение или сильный разброс оценки качества работы машиниста.

Проводимые исследования в статье полноценно могут быть интегрированы в систему интеллектуального централизованного управления движением внеуличного городского железнодорожного транспорта в условиях интенсивного движения [23].

2. Методы

СППР по профилактике нарушений безопасности в работе машиниста включает в себя следующие блоки (рис. 1):

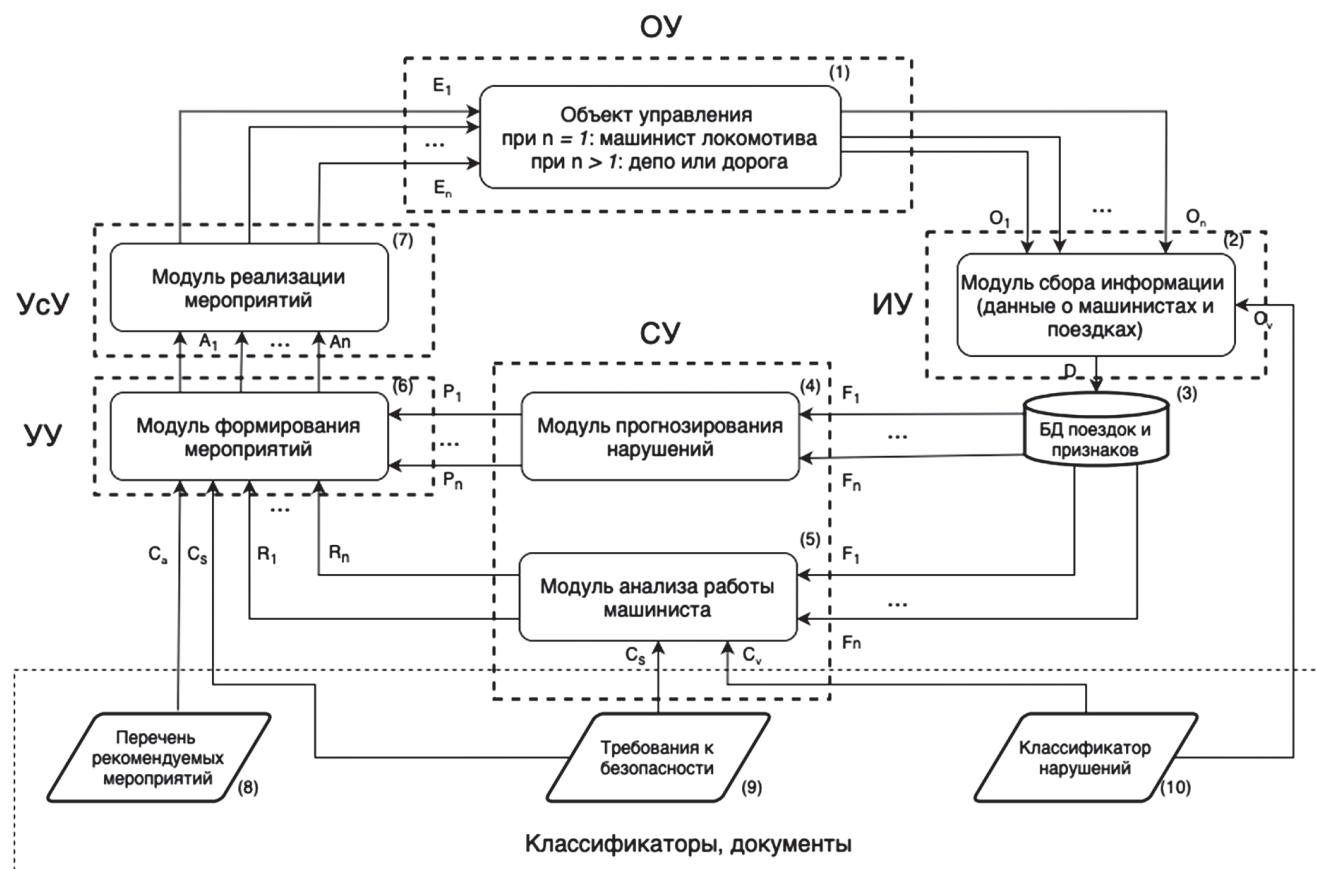


Рис. 1. Структурная схема СППР по профилактике нарушений безопасности в работе машиниста (ОУ – объект управления; ИУ – измерительное устройство; СУ – сравнивающее устройство; УУ – устройство управления; ИсУ – исполнительное устройство)

1. Объект управления – машинист или группа машинистов, объединенные в рамках одного депо или железной дороги. На вход данный блок получает управляющие воздействия $[E_1, E_2, \dots, E_n]$, а на выходе формируется массив реакций, который совершает объект управления, $[O_1, O_2, \dots, O_n]$.

2. Модуль сбора информации фиксирует (измеряет) информацию о машинистах и записывает ее в базу данных. Важно отметить, что информация фиксируется в различных АСУ ОАО «РЖД». На выходе данного модуля формируется массив D .

3. База данных – это единое физическое хранилище больших данных, которые собираются из различных АСУ ОАО «РЖД» с использованием информационной системы «Доверенная среда локомотивного комплекса» [24]. В данном хранилище содержится необработанная информация о машинистах и результаты расчета показателей их работы. На выходе данного блока формируется вектор показателей $[F_1, F_2, \dots, F_n]$.

4. Модуль прогнозирования нарушений рассчитывает вероятности совершения нарушений машинистами на основе показателей, характеризующих их работу. На выходе данного блока формируется вектор вероятностей $[P_1, P_2, \dots, P_n]$, хранящий информацию о вероятности возникновения грубого нарушения и вероятностях возникновения конкретных нарушений.

5. Модуль анализа работы машиниста агрегирует информацию о рейтинге машинистов [25], количестве и составе совершенных нарушений, группах риска машиниста, медицинские показатели машиниста в предыдущих поездках. На вход модуля кроме уже описанной поступает следующая информация:

– C_v – классификатор регистрируемых нарушений и нештатных ситуаций, выявляемых при расшифровке скоростемерных лент и других носителей информации;

– C_s – требования по безопасности, утвержденные в ОАО «РЖД»;

– $[F_1, F_2, \dots, F_n]$ – вектор признаков и характеристик машиниста.

На выходе модуля формируются значения $[R_1, R_2, \dots, R_n]$ функции принадлежности машиниста к одной из групп надежности и критерии формирования перечня профилактических мероприятий, рекомендуемых для повышения надежности машиниста.

6. Модуль планирования мероприятий формирует перечень профилактических мероприятий, рекомендуемых для повышения надежности конкретного машиниста, депо, железной дороги. На вход модуля кроме уже описанной информации поступает перечень профилактических мероприятий C_{op} , которые могут быть рекомендованы для повышения надежности машиниста.

На выходе модуля формируется перечень мероприятий и действий $[A_1, A_2, \dots, A_n]$, направленных на повышение уровня безопасности движения поездов.

7. Модуль реализации мероприятий формирует массив $[E_1, E_2, \dots, E_n]$ управляющих воздействий, оказывающих влияние на объект управления.

Исходя из сформированной структурной схемы СППР по профилактике нарушений безопасности в работе машиниста (см. рис. 1) определим задачи, решение которых рассмотрено в данной статье:

а) определение множества показателей работы машиниста, используемых СППР;

б) разработка алгоритма прогнозирования нарушений в работе машинистов с целью формирования групп надежности в рамках СППР;

в) разработка алгоритма формирования перечня профилактических мероприятий, рекомендуемых для повышения надежности машиниста, на основе анализа результатов работы алгоритмов прогнозирования нарушений в работе машиниста;

г) реализация СППР по профилактике нарушений безопасности в работе машиниста в рамках автоматизированной информационной системы управления ОАО «РЖД».

3. Результаты определения множества показателей работы машиниста, используемых СППР по профилактике нарушений безопасности в работе машиниста

В исследовании анализировались 90 показателей, характеризующих работу машиниста, полученных и сгенерированных из 7 АСУ ОАО «РЖД». Все показатели можно разбить на группы: топливо-энергетический расход; дисциплинарные (связанные с нарушениями безопасности в прошлом); медицинские; соблюдение режима работы; взаимодействие с помощником; уровень знаний; взаимодействие с машинистом-инструктором; базовая информация (например: стаж, класс и т.п.). Всего проанализированы данные более 4,2 млн поездок за период с 01.01.2020 по 01.08.2020.

4. Разработка алгоритма прогнозирования нарушений в работе машинистов с целью формирования групп надежности в рамках СППР по профилактике нарушений безопасности в работе машиниста

Алгоритм прогнозирования нарушений в работе машинистов решает задачу бинарной классификации по прогнозированию совершения нарушения машинистом в ближайшее время. В качестве тестовой выборки использовалось порядка 850 тыс. поездок машинистов.

В качестве меток для задачи прогнозирования нарушений безопасности были выбраны грубые нарушения с установленной виной машиниста, которые могут быть совершены в ближайшие 3, 7, 10, 20, 30, 60 дней. Выборка меток машинистов является несбалансированной. Данная проблема и возможные способы ее решения освещены в статье [26].

При решении задачи бинарной классификации требуется использовать только тот способ оценки качества работы модели, который отражает объективную ситуацию. В данной задаче корректнее использовать точность (Assigasu), гармоническое среднее (F-мера), площадь под кривой ошибок (AUC ROC). В табл. 1 приведены результаты решения задачи прогнозирования с исполь-

Табл. 1. Результаты работы моделей бинарной классификации для горизонта прогнозирования 30 дней

№	Алгоритм	Метрика	Способ преобразования категориальных признаков				
			Label encode + Масштаб.	One hot encode + Масштаб.	Метод главных компонент	Частотное представление + масштаб.	Autoencoder
1	Логистическая регрессия	Accuracy	0,7535	0,7767	0,7535	0,7682	0,7511
		F-мера	0,0854	0,1090	0,0854	0,1140	0,1865
		AUC_ROC	0,7239	0,6930	0,7239	0,4078	0,4242
2	Случайные леса	Accuracy	0,8043	0,6961	0,6294	0,9829	0,6811
		F-мера	0,1235	0,2246	0,2461	0,2048	0,2342
		AUC_ROC	0,7495	0,6100	0,6367	0,8177	0,6379
3	Градиентный бустинг над решающими деревьями	Accuracy	0,7732	0,7637	0,6396	0,9712	0,9023
		F-мера	0,1860	0,3620	0,4242	0,7248	0,5574
		AUC_ROC	0,6920	0,7532	0,7658	0,9885	0,7322
4	Нейронные сети	Accuracy	0,5331	0,6740	0,5913	0,6142	0,9083
		F-мера	0,1432	0,3215	0,2832	0,2776	0,2223
		AUC_ROC	0,7421	0,6860	0,7192	0,6743	0,8822

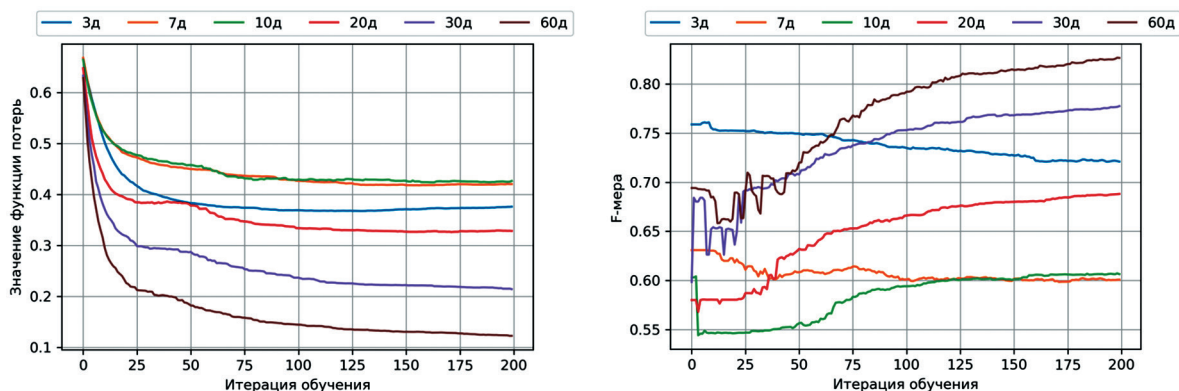


Рис. 2. Результаты работы градиентного бустинга над решающими деревьями при частотном представлении категориальных признаков при различном горизонте прогнозирования

зованием различных алгоритмов машинного обучения и способов представления категориальных признаков [27]. На рис. 2 представлены результаты работы градиентного бустинга над решающими деревьями при частотном представлении категориальных признаков при различных горизонтах прогнозирования.

Результаты обучения бинарного классификатора показывают (рис. 3), что определение вероятности совершения нарушения в ближайшие дни является нетривиальной и непростой задачей. Результаты приведены для двух горизонтов прогнозирования: на 30 и 60 дней. Получилось, что алгоритм сделал верный прогноз: в 76% случаях при пороге 0,7 и горизонте 30 дней; в 82% случаях при пороге 0,9 и горизонте 60 дней. Перспективным направлением решения поставленной задачи является интеграция различных подходов к прогнозированию возникновения нарушений безопасности в работе машиниста. Лучшие результаты по обработке данных показал градиентный бустинг над решающими деревьями при частотном представлении категориальных признаков.

В качестве дополнительных результатов с помощью лучшей из рассмотренных модели градиентного бустинга над решающими деревьями при частотном

представлении категориальных признаков определены 10 наиболее значимых показателей работы машинистов (рис. 4).

5. Разработка алгоритма формирования перечня профилактических мероприятий, рекомендуемых для повышения надежности машиниста, на основе анализа результатов работы алгоритмов прогнозирования нарушений в работе машиниста

Предложен способ формирования групп надежности машинистов на основе квантилей распределения оценок вероятности совершения нарушения и определения уровня надежности в ближайшем будущем. В качестве разграничителей групп надежности, сформированным по значениям вероятностей отсутствия нарушений безопасности движения машинистом, взяты квантили: 0,2, 0,1, 0,01. Данные значения выбраны авторами экспериментально и могут меняться при увеличении объема исследуемых данных или модификации модели.

Исходя из полученных квантилей выделено 4 группы надежности машинистов:

- а) высокий уровень надежности (0,96; 1];
- б) допустимый уровень надежности (0,73; 0,96];
- в) недопустимый уровень надежности (0,39; 0,73];
- г) критический уровень надежности (0; 0,39].

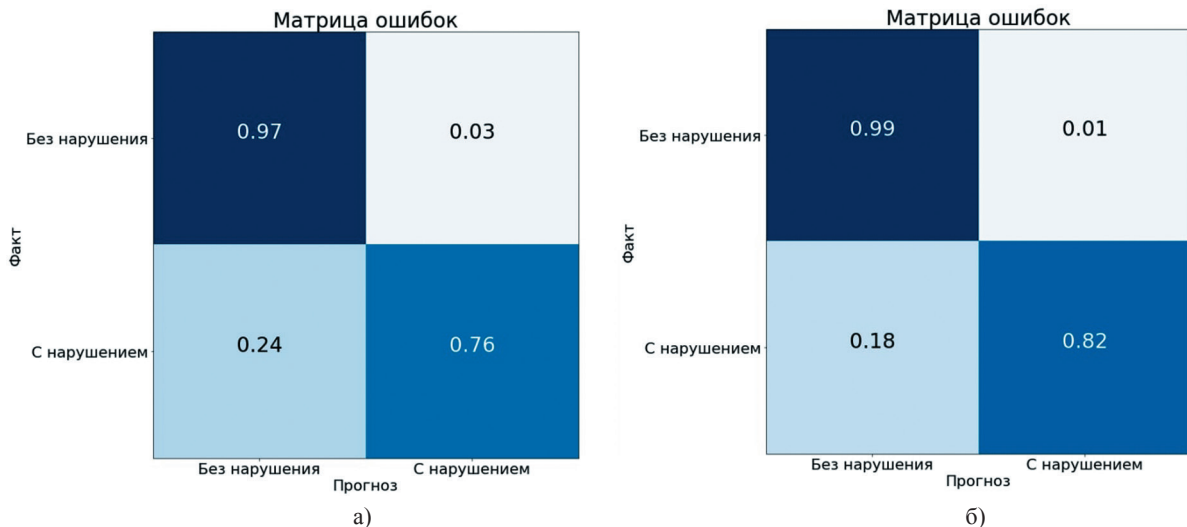


Рис. 3. Матрица ошибок для горизонтов прогнозирования: а) 30 дней; б) 60 дней



Рис. 4. Значимости категориальных признаков для алгоритма градиентный бустинг над решающими деревьями при частотном представлении категориальных признаков

Помимо алгоритма прогнозирования факта совершения нарушения разработан алгоритм, который позволяет прогнозировать тип нарушения безопасности. Данный алгоритм достаточно подробно представлен в статье [28]. Подходы, используемые для прогнозирования типа нарушения, относятся к области рекомендательных систем и построены на базе нейронных сетей.

6. Реализация СППР по профилактике нарушений безопасности в работе машиниста в рамках автоматизированной информационной системы управления ОАО «РЖД»

Рассмотрим подход к формированию перечня рекомендуемых профилактических мероприятий, который основан на анализе принадлежности машиниста к группе надежности, вероятности факта совершения грубого нарушения, совершенных ранее и прогнозируемых нарушений.

Работа алгоритма (рис. 5) инициируется запросом пользователя информационной системы информации о возможности постановки машиниста в поездку. Глубина проверки наличия ранее совершаемых нарушений (количество дней) N – это параметр, задаваемый руководителями ОАО «РЖД» соответствующей Центральной дирекции. Рекомендуемый параметр для установки в системе по

умолчанию $N=20$, что является средним количеством поездок машиниста в месяц. Если за N дней нарушений не было найдено, то запускается процесс расчета значения вероятности нарушения в ближайшее время (Блок 7). На вход данного блока поступает вектор признаков и характеристик машиниста F . На выходе данного блока рассчитывается вероятность совершения грубого нарушения в ближайшее время P . Затем, после расчета P , производится сравнение с допустимым порогом r , который должен быть задан руководителями ОАО «РЖД» соответствующей Центральной дирекции. Если P не превысило порог r , то машинист допускается до поездки.

Если за N дней нарушения были найдены, то запускается рекомендательная подсистема или рекомендательная модель (Блок 8), которая формирует список нарушений, которые с большей вероятностью может совершить данный машинист в будущем. На вход данного блока подается вектор F и глубина прогноза m (настраиваемый параметр). На выходе формируется отсортированный по значимости список прогнозируемых нарушений V длиной m . Затем список нарушений V передается на вход Блока 9, где производится расчет количества Q грубых нарушений или нарушений, чей вес превышает заданный пороговый коэффициент m .

Если $Q > n$, то запускается алгоритм расчета вероятности совершения нарушения в ближайшее время, если $Q < n$, то машинист допускается к поездке после беседы с руководителем. На вход Блока 12 поступает список нарушений V , вероятность P и текущий рейтинг машиниста R . Для определения множества рекомендуемых мероприятий используются значения V и R . Интерпретировать P можно как величину, дополняющую уровень надежности машиниста до единицы.

Формирование рекомендаций и мероприятий для машиниста осуществляется на базе информации о прогнозируемых и совершенных ранее нарушениях. Каждое нарушение характеризуется двумя группами факторов: общая характеристика (грубое или негрубое нарушение, с нарушением регламента, с возможностью нарушения безопасности, с нарушением безопасности) и человеческий фактор (низкий уровень знаний, недостаток опыта, невнимательность, отвлечение, спешка, халатность).

Мероприятия, применяемые к машинисту, разделяются на две класса: «краткосрочные» – перед поездкой; «долгосрочные» – после поездки.

Алгоритм формирования мероприятий состоит из следующих шагов:

1. Для всех совершенных машинистом нарушений K за последние N дней происходит суммирование на-

бранных уровней значимости перечисленных факторов, умноженных на веса (2):

$$F_v = \sum_{i=1}^K w_i \cdot f_i \quad (2)$$

где w_i – вес i -го нарушения, f_i – вектор факторов i -го нарушения, F_v – суммарный вектор уровней влияний (вектором рангов).

2. Производится перемножение матрицы соответствия факторов f и мероприятий E с вектором уровней влияний (вектором рангов) F_v .

3. Все мероприятия сортируются по неубыванию значимости, и каждому мероприятию присваивается ранг.

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

Заключение

Представлен обзор методов и систем оценки надежности человека и влияния человеческого фактора на безопасность транспортных систем, позволивший выбрать перспективные направления и методы решения задач прогнозного анализа работы машиниста, к которым относятся методы машинного обучения.

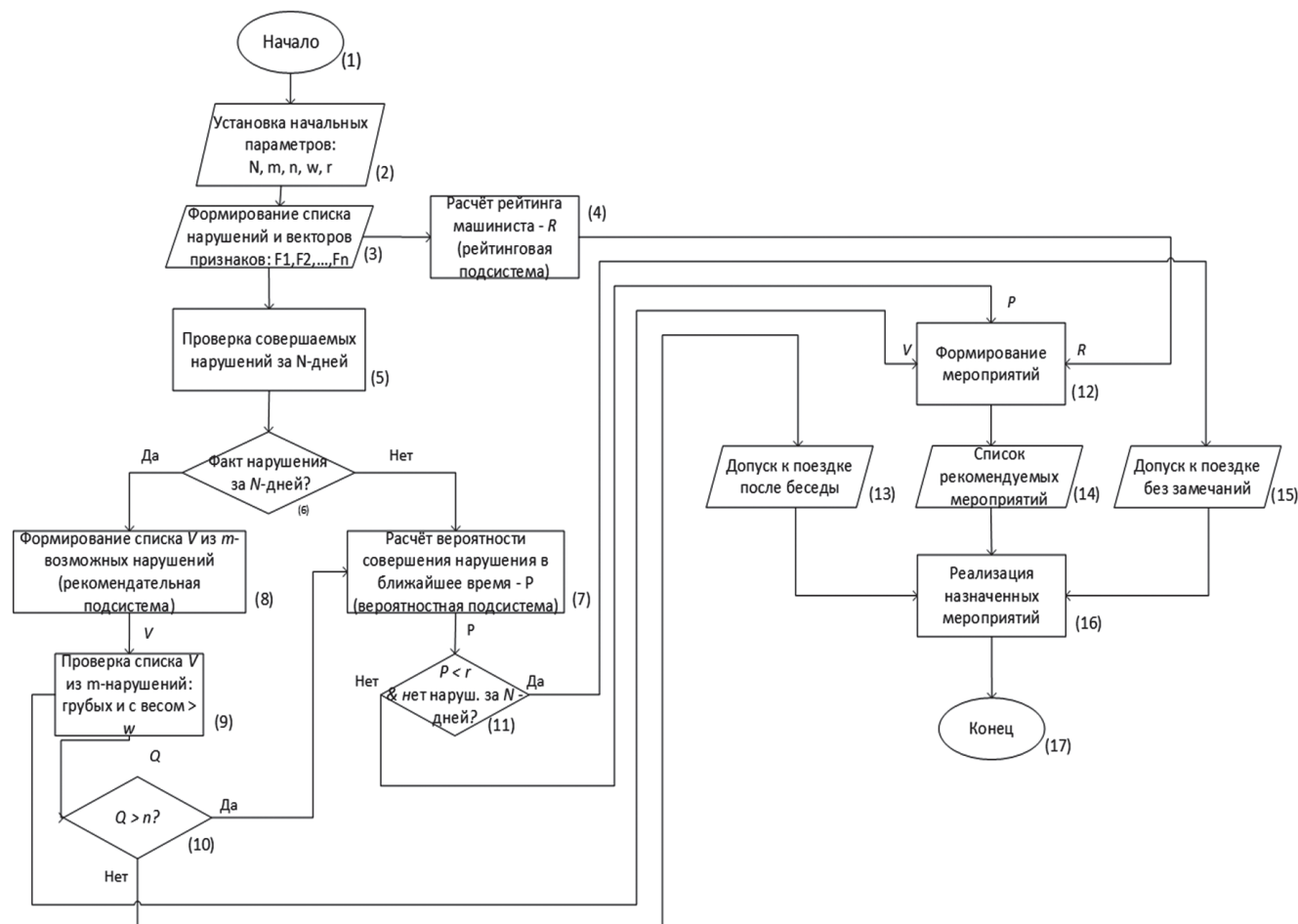


Рис. 5. Структурная схема решающего правила по формированию перечня рекомендуемых профилактических мероприятий

Построены и реализованы в рамках разработанной структуры СППР по профилактике нарушений безопасности в работе машиниста математические модели машинного обучения, дающие возможность решать поставленные перед системой задачи определения уровня надежности машиниста, вероятности совершения нарушения в будущем и формирования перечня профилактических мероприятий, рекомендуемых для повышения надежности работы машиниста.

Определено множество показателей работы машиниста, используемых для определения влияния надежности машиниста на безопасность движения поездов, путем создания и применения метода определения показателей работы машинистов, учитывающих динамику изменения качества работы машиниста в прошлом, что позволило сформировать исходные данные для построения математических моделей СППР по профилактике нарушений безопасности в работе машиниста.

Произведен анализ результатов функционирования алгоритмов машинного обучения на тестовой выборке, который позволил выявить, что модель, основанная на градиентном бустинге над решающими деревьями при частотном представлении категориальных признаков, показывает лучшие результаты для задачи бинарной классификации на горизонте прогнозирования 30 и 60 дней. Данные модели позволяют агрегировать информацию о машинистах для принятия точечных и временных профилактических мероприятий, рекомендуемых для повышения надежности машиниста.

Сформулированный подход по формированию профилактических мероприятий внедрен в трех депо ОАО «РЖД» в режиме опытной эксплуатации.

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. Свидетельство 2019612885. Развитие системы учета и анализа нарушений безопасности движения поездов по результатам автоматической расшифровки кассет регистрации локомотивных устройств (АСУТ НБД-2): программа для ЭВМ / А.П. Голицын, А.А. Маслов, Д.А. Ручкин (RU); правообладатель Открытое акционерное общество «Российские железные дороги». № 2019612885; заявл. 22.02.19; опублик. 04.03.2019, 300 Мб.
2. Шубинский И.Б. Структурная надежность информационных систем. Методы анализа. М: Журнал «Надежность» – 2012. – 212 с.
3. Шубинский И.Б. Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа. М: Журнал «Надежность» – 2012. – 296 с.
4. Swain A.D. Human reliability analysis: Need, status, trends and limitations // Reliability Engineering & System Safety, Vol. 29, No. 3, 1990. pp. 301-313.

5. Swain A. D., Guttman H.E. Handbook of human-reliability analysis with emphasis on nuclear power plant applications, Sandia National Labs, Final report №. NUREG/CR--1278, 1983.
6. Corlett E.N., Wilson J.R. Evaluation of human work. CRC Press, 1995.
7. Forester J.A., Ramey-Smith A., Bley D.C. Discussion of comments from a peer review of a technique for human event analysis (ATHEANA). Sandia National Laboratories, 1998.
8. Holmberg J.E., Bladh K., Oxstrand J. The Application of the Enhanced Bayesian THERP in the HRA Methods Empirical Study Using Simulator Data // Proc. of PSAM, 2008.
9. Cooper S.E., Ramey-Smith A.M., Wreathall J.A. technique for human error analysis. USNRC ed. Washington: DC: NUREG/CR-6350, 1996.
10. Hidayatulloh A. Dampak adaptasi presentasi tree-view terhadap niat untuk melakukan pembelian secara online: emosi dan sikap pengguna sebagai mediator (didasarkan pada stimulus-organism-response model) // Optimum: Jurnal Ekonomi dan Pembangunan, Vol. 5, No. 2, 2015. pp. 147-156.
11. Горелик А.В., Тарадин Н.А., Журавлев И.А. Методы анализа безопасности функционирования систем железнодорожной автоматики и телемеханики // Надежность. 2011. №. 1. С. 40-46.
12. Лисенков В.М. Безопасность и эффективность перевозочных процессов // Экономика железных дорог. 2008. № 4. С. 33-42.
13. Пат. 133960 Российская Федерация. Мобильный учебный демонстрационный комплекс устройств безопасности движения железнодорожного транспорта / Ю.И. Попов, А.Г. Ройзнер, Б.Л. Зеликман, М.А. Певзнер, Ф.В. Янковский: заявитель Открытое акционерное общество «Российские железные дороги». № 2013125124/11; заявл. 30.05.13; опублик. 27.10.13.
14. Кучумов В.А., Никифорова Н.Б., Мурзин Р.В. и др. Методы прогнозирования потребления электроэнергии на тягу поездов // Наука и техника транспорта. 2015. № 3. С. 104-110.
15. Тельпов Б.В., Борисенков С.С. Универсальная система автоматизированного ведения пассажирского поезда // Железнодорожный транспорт 2011. № 3. С. 48-52.
16. Колмаков В.О., Зубков В.В., Новиков А.В. Система автоматического управления тормозами САУТ // Инновации. Наука. Образование. 2020. № 22. С. 545-549.
17. Пат. 2420418 Российская Федерация. Комплексное локомотивное устройство безопасности / В.И. Зорин, С.А. Перевозчиков, А.С. Рычков: заявитель Открытое акционерное общество «Ижевский радиозавод». № 2007145632/11; заявл. 11.12.07; опублик. 10.06.11.
18. Бугаев А.С., Герус С.В., Дементенко В.В. и др. Телемеханическая система контроля бодрствования машиниста // Бюллетень объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2017. № 2. С. 21-41.

19. А.с. 990573 Российская Федерация. Устройство для контроля бдительности машиниста / Я.Г. Шихер, Ю.Е. Бовэ, Ю.М. Меерзон, Е.В. Орешкин, В.М. Шахнарович; заявитель: Проектно-конструкторское бюро главного управления локомотивного хозяйства министерства путей сообщения СССР. № 3337528; заявл. 11.08.81; опубл. 23.01.83.

20. Бодров В.А., Орлов В.Я. Психология и надежность: человек в системах управления техникой. М.: «Институт психологии РАН», 1998. 288 с.

21. Апатцев В.И., Завьялов А.М., Синякина И.Н. и др. Обеспечение безопасности движения поездов на основе снижения влияния человеческого фактора // Наука и техника транспорта. 2014. № 2. С. 75-78.

22. 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.

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

24. Свидетельство 2020613754. Автоматизированная система Доверенная среда локомотивного комплекса: программа для ЭВМ / О.В. Харин, С.М. Якимов, М.А. Кулагин и др. (RU); правообладатель Открытое акционерное общество «Российские железные дороги». № 2020613754; заявл. 11.03.2020; опубл. 23.03.2020, 490 Кб.

25. Сидоренко В.Г., Кулагин М.А. Подход к формированию рейтинга работы машиниста с использованием различных метрик сравнения // Электроника и электрооборудование транспорта. 2018. № 1. С. 14-17.

26. Кулагин М.А., Сидоренко В.Г. Квалификация машинистов как фактор повышения надежности работы

электроподвижного состава // Наука и техника транспорта. 2018. № 4. С. 70-76.

27. Dorogush A.V., Ershov V., Gulin A. CatBoost: gradient boosting with categorical features support // arXiv preprint arXiv:1810.11363. 2018.

28. 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.

Сведения об авторах

Максим Алексеевич Кулагин – заместитель начальника отдела разработки технологических информационных систем АО «ВНИИЖТ», ул. 3-я Мытищинская, д. 10, Москва, Российская Федерация, 129626, e-mail: maksimkulagin06@yandex.ru

Валентина Геннадьевна Сидоренко – 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

Вклад авторов в статью

Кулагин М.А. Определено множество показателей работы машиниста, разработаны алгоритмы прогнозирования нарушений в работе и формирования перечня профилактических мероприятий, рекомендуемых для повышения надежности машиниста, проанализированы результаты их работы.

Сидоренко В.Г. Проведен анализ методов влияния человеческого фактора на автоматизированные системы управления, представлен обзор методов анализа надежности человека.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Способ проверки релейной защиты и автоматики при каскадном воздействии для повышения надежности электроснабжения и устойчивости электроэнергетических систем

Александр М. Конюхов¹, Александр В. Хлебнов¹, Виталий А. Тиманов^{2*}

¹ВУНЦ СВ «ОВА ВС РФ», Москва, Российская Федерация, ²АО «Силовые машины», Москва, Российская Федерация

*vitaliy@timanov.ru



Александр М.
Конюхов



Александр В.
Хлебнов



Виталий А.
Тиманов

Резюме. Цель статьи – показать, что повышение надежности электроснабжения и устойчивости электроэнергетических систем производится путем применения новых способов проверки релейной защиты и автоматики (РЗА). Возникновение крупных каскадных аварий в электроэнергетических системах является следствием каскадного воздействия, т.е. воздействия, включающего в себя несколько последовательных воздействий различной природы. Каскадное воздействие позволяет расширить функционал при проверке РЗА и учесть временной фактор при воздействиях различной природы. **Метод.** Предложен способ проверки релейной защиты и автоматики, учитывающий каскадное воздействие, который применяется при разработке, калибровке и установке приборов защиты для работы при заранее определенных режимах с целью повышения надежности электроснабжения и сохранения устойчивости электроэнергетической системы. **Результат.** Каскадное воздействие с интервалами времени не позволяет релейной защите и автоматике вывести электроэнергетическую систему из послеаварийного режима, снижая уровень динамической устойчивости до критического. Схема воздействия на релейную защиту и автоматику позволяет учесть воздействие внешней среды при проверке релейной защиты и автоматики. **Вывод.** Предложенный способ каскадного воздействия при проверке релейной защиты и автоматики может быть применен при разработке, калибровке и установке защиты электроэнергетических систем и позволит повысить устойчивость электроэнергетических систем и надежность электроснабжения.

Ключевые слова: релейная защита и автоматика, каскадное воздействие, электроэнергетическая система, устойчивость, надежность, нормальный режим, аварийный режим, послеаварийный режим, аварийный режим с потерей устойчивости.

Для цитирования: Конюхов А.М., Хлебнов А.В., Тиманов В.А. Способ проверки релейной защиты и автоматики при каскадном воздействии для повышения надежности электроснабжения и устойчивости электроэнергетических систем // Надежность. 2021. №4. С. 47-52. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-4-47-52>

Поступила 05.07.2021 г. / После доработки 17.11.2021 г. / К печати 14.12.2021

Введение

Системы защиты и противоаварийного управления позволяют достаточно быстро локализовать поврежденный участок и вывести его из работы, сохранив (с минимальными потерями) работоспособность системы. Вместе с тем, имеют место крупные системные (каскадные) аварии, сопровождающиеся отключением большого количества потребителей, нарушением параллельной работы электростанций и энергосистем.

Предпосылками масштабной энергетической катастрофы 14 августа 2003 года в США явилось опережение развития структуры электроэнергетической системы имеющихся возможностей системы управления. При крупной каскадной аварии 25 мая 2005 года в Москве – отсутствие отдельных классов защиты и недостаточное внимание к природе системных (каскадных) аварий [1, 2].

Масштаб, социальные и экономические последствия таких аварий зависят от учета их характера на этапах разработки, создания и проверки способов и средств защиты электроэнергетических систем.

Электроэнергетическая система – та часть энергетической системы, в которой теплота и различные виды энергии преобразуются в электрическую энергию, передаваемую на расстояние, распределяемую по потребителям, где она вновь преобразуется [3].

Надежность электроснабжения – это способность электрической системы снабжать присоединенных к ней потребителей электрической энергией заданного качества в любой интервал времени [4].

Под устойчивостью электроэнергетической системы понимают способность системы восстанавливать исходный режим после его возмущения $Y_{уст}, Y_{мин}$ [3, 5, 6].

Релейная защита и автоматика – релейная защита, сетевая автоматика, противоаварийная автоматика, ре-

жимная автоматика, регистраторы аварийных событий и процессов, технологическая автоматика объектов электроэнергетики [7].

Будем рассматривать РЗиА как единую систему, представляющую собой совокупность взаимосвязанных подсистем релейной защиты, автоматики и регистраторов аварийных событий и процессов, функционирующих совместно или отдельно для решения на всех уровнях задач сохранения работоспособности оборудования и его защиты, управления и мониторинга режимов с целью надежного электроснабжения и сохранения устойчивости электроэнергетической системы (рис. 1).

Каждое воздействие на электроэнергетическую систему приводит к падению уровня устойчивости (рис. 2). Роль релейной защиты и автоматики в этом случае сводится к восстановлению нормального режима работы системы, связанному именно с повышением устойчивости.

Повторение цикла воздействий приводит к постепенному падению уровня устойчивости электроэнергетической системы до такого, который можно назвать критическим $Y_{\text{кр}}$, а сама электроэнергетическая система

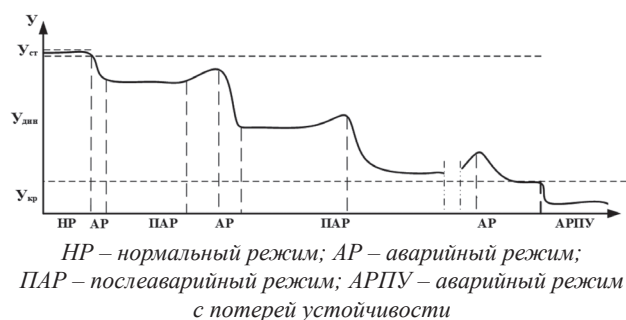


Рис. 2. График падения уровня устойчивости электроэнергетической системы при многократных воздействиях

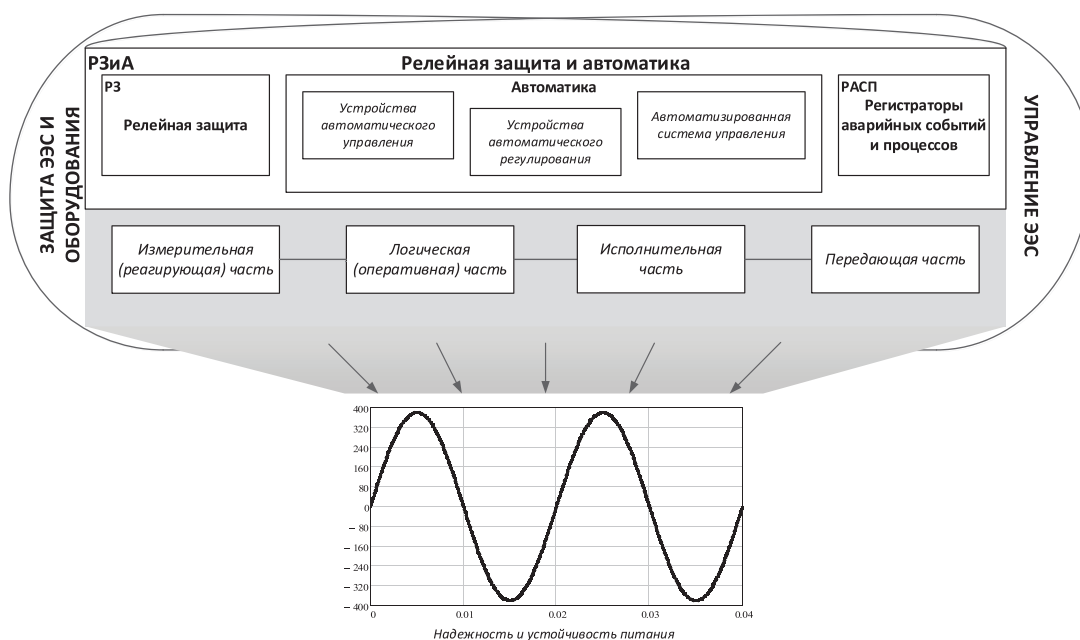


Рис. 1. Релейная защита и автоматика: состав: цели

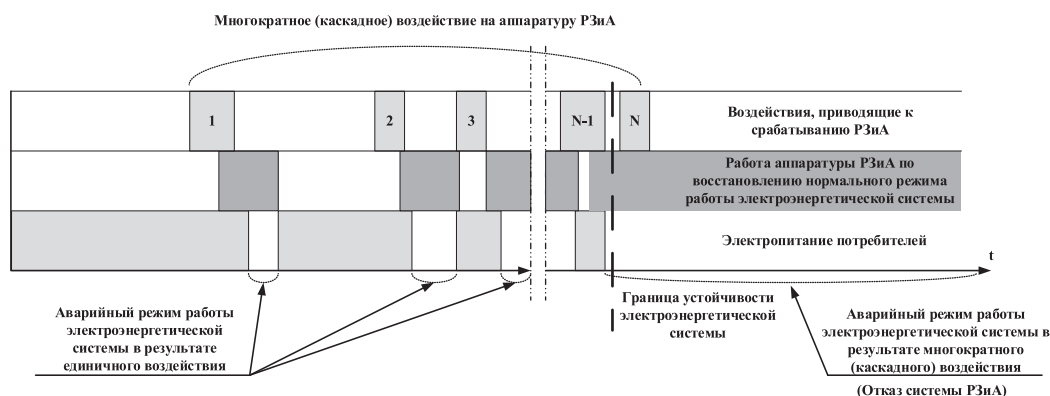


Рис. 3. Диаграмма работы аппаратуры релейной защиты и автоматики при электропитании потребителей при воздействиях, приводящих к ее срабатыванию

переходит в аварийный режим с потерей устойчивости (АРПУ), при котором релейная защита и автоматика не способны восстановить ее нормальную работу.

Сами воздействия при этом повторении являются многократными и носят различную природу. Такие многократные воздействия являются каскадным воздействием, т.е. воздействием, включающим в себя несколько последовательных воздействий различной природы.

Так как работоспособное состояние – это состояние объекта, при котором он способен выполнять (или выполняет) заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных технической документацией [4], а при наступлении АРПУ электроэнергетическая система не способна выполнять свою основную функцию по передаче электрической энергии потребителю, следовательно, АРПУ является отказом системы. При этом отказ будет прежде всего связан с работой релейной защиты и автоматики именно как единой системы, представляющей собой совокупность взаимосвязанных подсистем релейной защиты, автоматики и регистраторов аварийных событий и процессов (рис. 3).

Существует большое количество как средств, так и способов построения и проверки РЗА [8, 9]. Однако они функционально ограничены областью применения и не предусматривают многократного воздействия на систему при каскадных авариях.

Повышение надежности электроснабжения и устойчивости электроэнергетических систем достигается путем расширения функционала проверки РЗА на этапах разработки, калибровки и установки приборов защиты.

1. Воздействия на релейную защиту и автоматику

Схема воздействия на релейную защиту и автоматику (рис. 4) включает в себя прямое воздействие внешней среды на релейную защиту и автоматику, воздействие внешней среды через электрооборудование электроэнергетической системы и воздействие со стороны электрооборудования.



Рис. 4. Схема воздействия на релейную защиту и автоматику

К прямым воздействиям со стороны внешней среды на релейную защиту и автоматику можно отнести кибератаки на микропроцессорную технику и электронику терминалов; умышленное невыполнение команд диспетчера оперативным персоналом, физическое повреждение аппаратуры релейной защиты и автоматики.

Воздействия внешней среды через электрооборудование электроэнергетической системы на релейную защиту и автоматику включают преднамеренные воздействия – террористические атаки на объекты электроэнергетической системы; применение специального оружия в виде графитовых боеприпасов в ходе вооруженных конфликтов; вандальные действия, связанные с кражей металлоконструкций высоковольтных линий электропередачи и элементов оборудования подстанций, неоднократные расстрелы гирлянды изоляторов линий электропередачи, и случайные воздействия – стихийные погодные явления (обрыв и замыкания проводов из-за сильного ветра, падения деревьев и различных конструкций, короткие замыкания в результате удара молнии, разрушение опор линий электропередачи из-за землетрясений, наводнений, пожаров, оползней и т. п.); несоблюдение вертикальных габаритов строительной и другой тяжелой техники при прохождении под воздушной линией электропередачи; падение на воздушные линии и открытые распределительные устройства легкомоторных самолетов, бес-

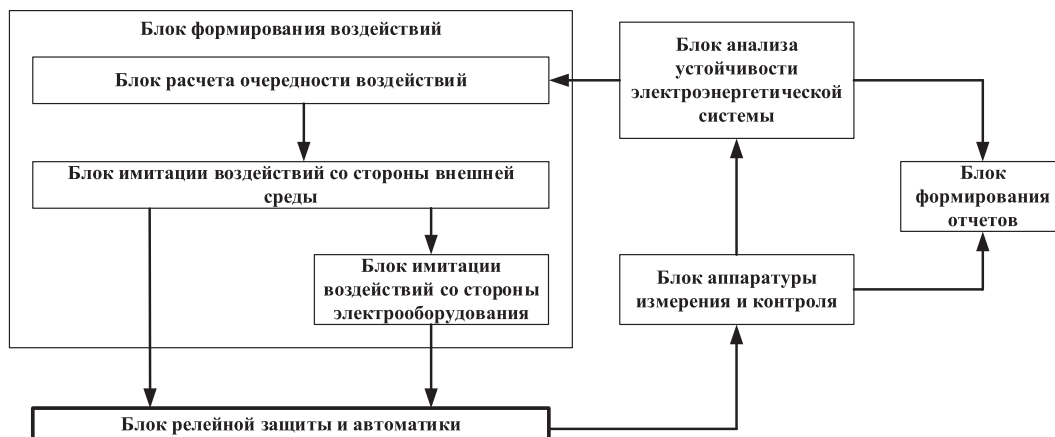


Рис. 5. Блок-схема проверки релейной защиты и автоматики при каскадном воздействии

пилотных летательных аппаратов и воздушных шаров; ошибки оперативного и диспетчерского персонала при обслуживании, эксплуатации и оперативных переключениях на объектах электроэнергетики.

К воздействиям со стороны электрооборудования электроэнергетической системы, которые приводят к срабатыванию релейной защиты и автоматики, относятся отказы оборудования, отражающие недостатки эксплуатации, дефекты ремонта, дефекты изготовления, истощение ресурса (износ), перегрузки сети (потребление электроэнергии превышает расчетные нормы).

2. Проверка релейной защиты и автоматики при каскадном воздействии

При разработке, калибровке и установке приборов защиты для работы при заранее определенных режимах проверка релейной защиты и автоматики при каскадном

воздействии осуществляется с учетом изменения уровня устойчивости электроэнергетической системы и воздействия внешней среды [10].

Она заключается в совокупности действий, реализующих отдельные функции, с установленной последовательностью (рис. 5).

Электронергетическая система функционирует в нормальном режиме НР до момента начала первого воздействия. Обеспечивается ее статическая устойчивость $Y_{ст}$ (рис. 6).

В блоке расчета очередности воздействий формируется команда на начало воздействия. При этом в блоке имитации воздействий со стороны внешней среды формируется первая команда выбора воздействия на релейную защиту и автоматику через электрооборудование.

Затем в блоке имитации воздействий со стороны электрооборудования формируется команда на имитацию воздействия на блок релейной защиты и автоматики со стороны электрооборудования. Имитируется

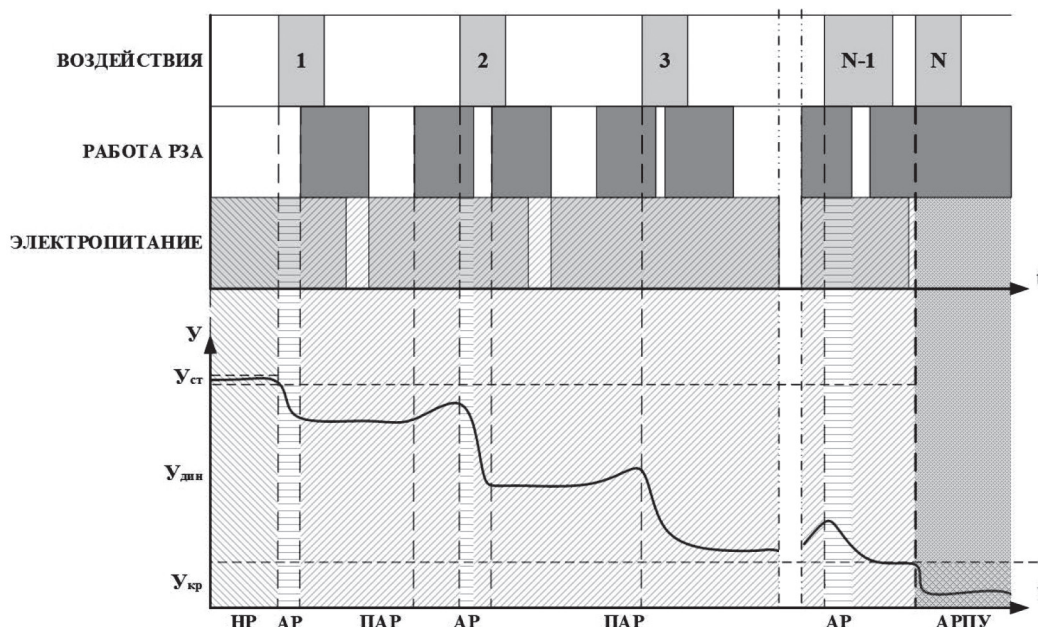


Рис. 6. Совмещенные график падения уровня устойчивости электроэнергетической системы при каскадных воздействиях и диаграмма проверки аппаратуры релейной защиты и автоматики при электропитании потребителей при каскадных воздействиях

функционирование электроэнергетической системы в аварийном режиме АР.

В блоке релейной защиты и автоматики производится отработка алгоритма защиты, соответствующего характеру воздействия. Срабатывая по своему функциональному назначению, релейная защита и автоматика ликвидируют аварийный режим АР и начинают выполнять последовательность действий по восстановлению нормального режима НР в электроэнергетической системе и поднятию уровня устойчивости. При этом электроэнергетическая система находится в послеаварийном режиме ПАР. Информация о состоянии элементов релейной защиты и автоматики, а также информация, отражающая состояние электроэнергетической системы, исходя из оценки выходных параметров релейной защиты и автоматики, поступает в блок аппаратуры измерения и контроля.

В блоке анализа устойчивости электроэнергетической системы входящая информация обрабатывается, и на ее основе происходит оценка изменения уровня устойчивости электроэнергетической системы.

Энергетическая система функционирует в послеаварийном режиме ПАР. Обеспечивается ее динамическая устойчивость $Y_{дин}$.

Далее в блоке расчета очередности воздействий формируется команда на начало второго воздействия с учетом времени, при котором релейная защита и автоматика не успевают выполнить полностью последовательность действий по восстановлению нормального режима НР электроэнергетической системы. В блоке имитации воздействий со стороны внешней среды формируется вторая команда выбора воздействия на релейную защиту и автоматику через электрооборудование и в блоке имитации воздействий со стороны электрооборудования формируется команда на имитацию воздействия на блок релейной защиты и автоматики со стороны электрооборудования.

Имитируется функционирование электроэнергетической системы в аварийном режиме АР.

В блоке релейной защиты и автоматики производится отработка алгоритма защиты, соответствующего характеру воздействия. Релейная защита и автоматика ликвидируют аварийный режим АР и начинают выполнять последовательность действий по восстановлению режима в электроэнергетической системе и поднятию уровня устойчивости. При этом электроэнергетическая система находится в послеаварийном режиме ПАР. Информация о состоянии элементов релейной защиты и автоматики, а также информация, отражающая состояние электроэнергетической системы, исходя из оценки выходных параметров релейной защиты и автоматики, поступает на вход блока аппаратуры измерения и контроля.

В блоке анализа устойчивости электроэнергетической системы входящая информация обрабатывается, и на ее основе происходит оценка изменения уровня устойчивости электроэнергетической системы.

Энергетическая система продолжает функционировать в послеаварийном режиме ПАР. Обеспечивается ее динамическая устойчивость $Y_{дин}$.

В блоке расчета очередности воздействий формируется команда на начало следующего воздействия с учетом времени, при котором релейная защита и автоматика не успевают выполнить полностью последовательность действий по восстановлению нормального режима электроэнергетической системы. А в блоке имитации воздействий со стороны внешней среды формируется следующая команда выбора воздействия на релейную защиту и автоматику со стороны внешней среды, а также команда на имитацию воздействия на блок релейной защиты и автоматики со стороны внешней среды.

Имитируется сбой в работе релейной защиты и автоматики, возникающий в результате воздействия на нее из внешней среды. При этом происходит сбой в процессе восстановления режима и падение уровня устойчивости электроэнергетической системы, которая продолжает находиться в послеаварийном режиме ПАР.

В блоке анализа устойчивости электроэнергетической системы входящая информация обрабатывается, и на ее основе происходит оценка изменения уровня устойчивости электроэнергетической системы.

В блоке формирования отчетов формируется отчет о текущем состоянии релейной защиты и автоматики и об оценке уровня устойчивости электроэнергетической системы.

В блоке аппаратуры измерения и контроля выполняется измерение параметров РЗА, оценка полноты выполнения требований по необходимому количеству воздействий и их последовательности, а также сравнение достигнутых и заданных параметров, для принятия решения по дальнейшему воздействию.

В блоке расчета очередности воздействия последовательность воздействий определяется из совокупности условий по времени:

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{НВ}^1 > 0, \\ t_{НЗ}^1 < t_{ОВ}^1 < t_{ННЭ}^1, \\ t_{НЗ}^2 < t_{НВ}^2 < t_{ОЗ}^2, \\ t_{НЗ}^3 < t_{ОВ}^2 < t_{ННЭ}^2, \\ t_{НЗ}^3 < t_{НВ}^3 < t_{ОВ}^3, \\ t_{НЗ}^4 < t_{ОВ}^3 < t_{ОЗ}^3, \\ \dots, \\ t_{НЗ}^{N-1} < t_{ОВ}^{N-1} < t_{ННЭ}^{N-1}, \\ t_{НЗ}^N < t_{ОВ}^{N-1}, \\ t_{НАРПУ} \leq t_{НВ}^N. \end{array} \right. \quad (1)$$

где $t_{НВ}^1, t_{НВ}^2, \dots, t_{НВ}^N$ – время начала воздействия, $t_{ОВ}^1, t_{ОВ}^2, \dots, t_{ОВ}^N$ – время окончания воздействия, $t_{НЗ}^1, t_{НЗ}^2, \dots, t_{НЗ}^N$ – время начала работы защиты (релейной защиты и автоматики), $t_{ОЗ}^1, t_{ОЗ}^2, \dots, t_{ОЗ}^N$ – время окончания работы защиты (релейной защиты и автоматики), $t_{ННЭ}^1, t_{ННЭ}^2, \dots, t_{ННЭ}^N$ – время начала кратковременного нарушения электроснабжения после воздействия и срабатывания защиты (релейной

защиты и автоматики), $t_{\text{НАРПУ}}$ – время начала аварийного режима с потерей устойчивости.

Содержание блоков представляет собой любую последовательность действий или любой метод, относящийся к функциональному содержанию блока.

Заключение

Как было сказано выше, повторение цикла воздействий приводит к постепенному падению уровня устойчивости электроэнергетической системы, что в конечном итоге приводит тому, что после N -го воздействия уровень устойчивости падает до критического $Y_{\text{кр}}$, а сама электроэнергетическая система переходит в аварийный режим с потерей устойчивости АРПУ, при котором релейная защита и автоматика не способны восстановить ее нормальную работу.

Таким образом, каскадное воздействие с интервалами времени, не позволяющими релейной защите и автоматике вывести электроэнергетическую систему из послеаварийного режима, позволяет снизить уровень динамической устойчивости до критического, а применение схемы воздействия на релейную защиту и автоматику позволяет учесть воздействие внешней среды при проверке релейной защиты и автоматики. Кроме того, способ каскадного воздействия при проверке релейной защиты и автоматики является важной составляющей в разработке, калибровке и установке защиты электроэнергетических систем, которые позволяют повысить устойчивость электроэнергетической системы и надежность электроснабжения.

Библиографический список

1. Kundur P. Power System Security in the New Industry Environment: Challenges and Solutions // IEEE Toronto Centennial Forum on Reliable Power Grids in Canada, October 3, 2003.
2. Отчет по расследованию аварии в ЕЭС России, произошедшей 25 мая 2005 года // Комиссия ОАО РАО «ЕЭС России», назначенная приказом № 331. Москва, 18 июня 2005 г.
3. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. М.: Высшая школа, 1985. 536 с.
4. Хорольский В.Я., Таранов М.А. Надежность электроснабжения. Ростов-на Дону: «Терра Принт», 2007. 128 с.
5. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е., Окин А.А. Расчеты устойчивости и противоаварийной автоматики в энергосистемах. М.: Энергоатомиздат, 1990. 390 с.
6. Жданов П.С. Вопросы устойчивости электрических систем. М.: Энергия, 1979. 456 с.
7. ГОСТ Р 55438-2013. Оперативно-диспетчерское управление. Релейная защита и автоматика. Взаимодействие субъектов электроэнергетики и потребителей электрической энергии при создании (модернизации) и эксплуатации. М.: Стандартинформ, 2014. 24 с.

8. Патент 2355090. Российская Федерация, МПК H02N 3/08. Способ быстросрабатывающей максимальной токовой защиты электрических цепей: № 2007134556/09: заявл. 17.09.2007: опубл. 10.05.2009 Бюл. № 13 / Г.Н. Гапоненко, А.С. Кобозев, В.В. Омельченко.

9. А.с. 1675964. СССР, МПК G01R 31/08. Способ проверки уставки срабатывания релейной защиты высоковольтных присоединений: № 4679319/21: заявл. 14.04.1989: опубл. 15.09.1991 Бюл. № 34 / А.П. Кузнецов, В.Г. Гловацкий, А.К. Белотелов.

10. Заявка на изобретение №2020126824 от 11.08.2020. Способ проверки релейной защиты и автоматики при каскадном воздействии. / Д.Н. Удинцев, А.В. Хлебнов, С.А. Смоголев, А.М. Конюхов.

Сведения об авторах

Александр Викторович Хлебнов – кандидат технических наук, доцент, докторант ВУНЦ СВ «ОБА ВС РФ», Москва, Российская Федерация, e-mail: xlebnovav@mail.ru.

Александр Михайлович Конюхов – кандидат технических наук, научный сотрудник ВУНЦ СВ «ОБА ВС РФ», Москва, Российская Федерация, e-mail: kam90@mail.ru.

Виталий Анатольевич Тиманов – ведущий инженер по электротехническому оборудованию Дивизион ЕРС Управление инженерного сопровождения АО «Силовые машины», Москва, Российская Федерация, e-mail: vitaliy@timanov.ru.

Вклад авторов в статью

Конюхов А.М. Проведен анализ изменения устойчивости электроэнергетической системы и ее влияния на надежность электроснабжения при воздействиях на релейную защиту и автоматику, а также совмещение процессов при каскадном воздействии, работы аппаратуры релейной защиты и автоматики при электропитании потребителей при воздействиях, приводящих к ее срабатыванию и изменения уровня устойчивости электроэнергетической системы.

Хлебнов А.В. Проведен анализ крупных каскадных аварий в электроэнергетических системах, а также, анализ и структуризация воздействий на релейную защиту. Составлена схема воздействий на релейную защиту и автоматику.

Тиманов В.А. Построена последовательность проверки релейной защиты и автоматики при каскадном воздействии с учетом изменения уровня устойчивости электроэнергетической системы и воздействия внешней среды на релейную защиту и автоматику. Составлена блок-схема проверки релейной защиты и автоматики при каскадном воздействии.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Оценка влияния готовности объектов транспортной инфраструктуры ОАО «РЖД» на риски потерь для перевозочного процесса

Александр В. Горелик¹, Александр Н. Малых¹, Александр В. Орлов^{1*}

¹Российский университет транспорта (РУТ(МИИТ)), Москва, Российская Федерация,

*suti.orlov@gmail.com



Александр В.
Горелик



Александр Н.
Малых



Александр В.
Орлов

Резюме. Цель. Готовность объектов транспортной инфраструктуры влияет на качество предоставляемых ОАО «РЖД» услуг железнодорожных перевозок. В то же время, это влияние может быть довольно различным в разных условиях эксплуатации транспортной инфраструктуры, на разных участках железных дорог и может приводить к разным по величине рискам ущерба для перевозочного процесса. Эти риски идентифицируют как риски потерь поездо-часов из-за отказов объектов транспортной инфраструктуры. При планировании мероприятий по управлению надежностью в условиях ограниченных ресурсов возникает необходимость адресного выявления объектов транспортной инфраструктуры, готовность которых наиболее сильно влияет на величину рисков ущерба для перевозочного процесса. Цель работы состоит в разработке метода оценки готовности на суточных интервалах времени и выявления их взаимосвязи с рисками потерь поездо-часов. **Методы.** В работе применены методы риск-менеджмента, теории вероятностей и математической статистики, корреляционного и регрессионного анализа. **Результаты.** В статье предложен способ представления показателя готовности объектов транспортной инфраструктуры ОАО «РЖД» на суточных интервалах времени в виде двухпараметрического гамма-распределения и описания его влияния на риски для перевозочного процесса регрессионной моделью. **Выводы.** Полученные в статье результаты могут быть использованы при планировании мероприятий по управлению надежностью объектов транспортной инфраструктуры и адресного распределения ресурсов, а также для обоснования коэффициента надежности при оценке наличной пропускной способности участков железных дорог и коэффициента заполнения и в ряде других эксплуатационных задач.

Ключевые слова: риски потерь поездо-часов, пропускная способность, надежность объектов транспортной инфраструктуры, готовность устройств на суточных интервалах, интервальная оценка

Для цитирования: Горелик А.В., Малых А.Н., Орлов А.В. Оценка влияния готовности объектов транспортной инфраструктуры ОАО «РЖД» на риски потерь для перевозочного процесса // Надежность. 2021. №4. С. 53-56. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-4-53-56>

Поступила 20.09.2021 г. / После доработки 17.10.2021 г. / К печати 14.12.2021 г.

Введение

Реализация перевозочного процесса на железных дорогах России связана с технической эксплуатацией территориально распределенной транспортной инфраструктуры, представленной совокупностью объектов, закрепленных за различными хозяйствами [1].

Надежность функционирования объектов транспортной инфраструктуры (ОТИ) оказывает существенное влияние на качество реализуемых перевозок. При нахождении ОТИ в неработоспособном состоянии может возникнуть риск ущерба в виде задержек поездов по отправлению, проследованию или прибытию.

Понятие риска позволяет учесть как вероятностный характер отказов в ОТИ, так и величину возникающего ущерба для перевозок. В связи с этим в ОАО «РЖД» применительно к технической эксплуатации инфраструктуры получила развитие концепция риск-менеджмента [1, 2]. Риск рассматривают как сочетание вероятности (частоты) рискованных событий – отказов и величины возникающего на одно событие ущерба – потерь поездо-часов. Под потерями поездо-часов понимают задержки поездов, вызванные отдельным отказом ОТИ. При этом сами отказы в зависимости от величины связанного с ними ущерба для перевозочного процесса в компании принято относить к одной из трех категорий. К отказам 1 и 2 категории относят те, которые вызвали существенные потери поездо-часов, а к третьей – те, потери от которых незначительны или отсутствуют вовсе.

На основе данных об отказах 1 и 2 категории выполняется расчет показателей функциональной надежности ОТИ, характеризующих процесс реализации посредством ОТИ различных функций, связанных с обеспечением перевозочного процесса (предоставлением услуг).

Функциональная надежность используется при оценке некоторых показателей перевозочного процесса, в частности, наличной пропускной способности участков железных дорог, а также для оценки рисков потерь поездо-часов из-за отказов ОТИ. При этом в расчетах значения показателей функциональной надежности часто берутся усредненные для продолжительных интервалов времени, например, годовых. Стоит отметить, что наличная пропускная способность при этом рассчитывается для суточных интервалов времени. Учитывая, что отказы 1 и 2 категории являются событиями достаточно редкими, то связанные с ними потери бюджета времени при расчете наличной пропускной способности, а также поездо-часы потерь приходятся на конкретные сутки, тогда как в остальное время этих потерь нет. В связи с этим целесообразно показатели функциональной надежности рассматривать как случайные величины на тех же интервалах времени, то есть суточных.

В качестве исходных данных для оценки могут быть использованы статистические данные о моментах выявления отказов 1 и 2 категории, их продолжительности и связанных с ними потерях поездо-часов по каждому ОТИ, которые в рамках цифровой трансформации от-

расли к настоящему времени имеются в информационных системах компании, таких как КАСАНТ, АС-АНШ, АСУ-Ш-2, ЕК АСУИ и ряде других.

В качестве показателя функциональной надежности рассмотрим применяющийся на протяжении ряда лет в инфраструктурных подразделениях ОАО «РЖД» коэффициент готовности ОТИ по отказам 1 и 2 категории. Под этим коэффициентом понимают вероятность того, что ОТИ находится в состоянии, не вызывающем существенной задержки (более 6 минут) в движении поездов в произвольный момент времени.

Оценка коэффициента готовности объектов транспортной инфраструктуры по отказам 1 и 2 категории

Отдельные реализации K_{r12} – коэффициента готовности ОТИ по отказам 1 и 2 категории на суточных интервалах времени можно определить по формуле:

$$K_{r12} = \frac{T_{\text{сут}} - T_{\text{в12}}}{T_{\text{сут}}},$$

где $T_{\text{сут}}$ – суточный бюджет времени (с учетом технологических окон);

$T_{\text{в12}}$ – суммарное время нахождения ОТИ в неработоспособном состоянии, вызванном отказом 1 или 2 категории в течение суточного бюджета времени.

Статистическую оценку коэффициента K_{r12} целесообразно выполнять параметрически [3, 4] с использованием метода моментов и последующей аппроксимацией двухпараметрическим гамма-распределением [5].

С этой целью статистической обработке подвергают все реализации K_{r12} ОТИ на суточных интервалах, где регистрировались отказы 1 и 2 категории в течение периода наблюдения.

Первый статистический момент m_i при этом находят по формуле:

$$m_i = \frac{\sum_{j=1}^r (1 - K_{r12j})}{r},$$

где r – количество реализаций K_{r12} в периоде наблюдения.

Второй статистический момент σ_i определяют из выражения:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^r [(1 - K_{r12j}) - m_i]^2}{r - 1}}.$$

Плотность вероятности для случайной величины описывают формулой:

$$f(\beta) = \begin{cases} \beta^{k-1} \cdot e^{-\frac{\beta}{\theta}} \\ \theta^k \cdot \Gamma(k), & \beta \geq 0; \\ 0, & \beta < 0, \end{cases}$$

где

$$\Gamma(k) = \frac{1}{k} \cdot \prod_{n=1}^g \frac{\left(1 + \frac{1}{n}\right)^k}{1 + \frac{k}{n}},$$

а k и θ – параметры формы и масштаба.

В свою очередь параметры формы и масштаба находят по формулам:

– параметр формы k :

$$k = \frac{m_i^2}{D_i};$$

– параметр масштаба θ :

$$\theta = \frac{D_i}{m_i},$$

где D_i – выборочная дисперсия, определяемая, как:
 $D_i = \sigma_i^2$.

Далее может быть выполнена интервальная оценка случайной величины K_{r12} на суточных интервалах.

Доверительный интервал задается в виде односторонней оценки выражением:

$$P(K_{r12\theta} \leq K_{r12} \leq 1) = 1 - \int_0^{1-K_{r12\theta}} f(K_{r12}) dK_{r12}, \quad (1)$$

где $P(K_{r12\theta} \leq K_{r12} \leq 1)$ – доверительная вероятность того, что коэффициент K_{r12} будет не менее наперед заданного значения $K_{r12\theta}$.

С помощью формулы (1) может быть найдена доверительная вероятность $P(K_{r12\theta} \leq K_{r12} \leq 1)$ того, что истинное значение K_{r12} окажется в пределах $[1; K_{r12\theta}]$. Может быть решена и обратная задача, суть которой заключается в определении граничного значения $K_{r12\theta}$, задающего диапазон $[1; K_{r12\theta}]$, в пределах которого находится его истинное значение с заданной доверительной вероятностью.

Оценка и оценивание рисков потерь для перевозочного процесса

За время нахождения ОТИ в неработоспособном состоянии может возникать риск ущерба для перевозочного процесса в виде разных по величине задержек в движении поездов. Причем, величина задержек поездов сложным образом зависит не только от продолжительности нахождения ОТИ в неработоспособном состоянии, но и от множества иных факторов: класса и специализации железнодорожной линии, предоставляемых технологических окон, графика движения поездов, типа объекта и т.д.

Для оценивания риска потерь поездочных часов из-за отказов ОТИ в инфраструктурных подразделениях ОАО «РЖД» нашли применение матрицы рисков [6].

Пример матрицы рисков представлен на рис. 1.

Для оценки влияния готовности ОТИ на риски потерь поездочных часов требуется для вычисленного значения $K_{r12\theta}$ найти точку в клетке матрицы рисков на пересечении соответствующей строки на оси частот и столбца на оси ущерба [7].

С целью оценки влияния коэффициента готовности ОТИ по отказам 1 и 2 категории K_{r12} на величину потерь для перевозочного процесса авторами извлекались из информационных систем и исследовались статистические данные о реализациях K_{r12} и соответствующих потерях поездочных часов T_{12} на отказ.

Корреляционный анализ выявил устойчивую статистическую связь между K_{r12} ОТИ, функционирующих в пределах железнодорожных линий определенного класса и специализации, и величиной потерь поездочных часов T_{12} , приходящихся на отказ. Для оценки использовался коэффициент линейной корреляции, а анализ тесноты взаимосвязи выполнялся по шкале Чеддока. Выявлена отрицательная корреляционная связь с теснотой связи для ОТИ на железнодорожных линиях различных классов и специализаций от слабой до высокой.

		Ущерб в виде удельных потерь поездочных часов на отказ, T_{12}			
		Незначительный	Значительный	Существенный	Критический
Частота отказов 1 и 2 категории, f_{12}	Частое	Допустимый	Нежелательный	Недопустимый	Недопустимый
	Вероятное	Допустимый	Нежелательный	Нежелательный	Недопустимый
	Случайное	Допустимый	Допустимый	Нежелательный	Недопустимый
	Редкое	Не принимаемый в расчет	Допустимый	Нежелательный	Нежелательный
	Крайне редкое	Не принимаемый в расчет	Допустимый	Допустимый	Нежелательный
	Маловероятное	Не принимаемый в расчет	Не принимаемый в расчет	Допустимый	Нежелательный

Рис. 1. Матрица рисков потерь поездочных часов

В связи с этим для оценки влияния K_{r12} на ущерб в виде потерь поезд-часов может быть использована линейная аппроксимация вида:

$$\tilde{T}_{12} = \Theta \cdot K_{r12}$$

где Θ – коэффициент пропорциональности между K_{r12} и T_{12} , единый для всех ОТИ в пределах железнодорожных линий отдельных классов и специализаций, но различный для разных железнодорожных линий. Для каждого сочетания класса и специализации железнодорожной линии он находится из общего соотношения:

$$\Theta = \frac{\sum_{j=1}^u T_{12j}}{\sum_{j=1}^u K_{r12j}},$$

где u – количество реализаций K_{r12} по множеству ОТИ в пределах железнодорожной линии одного класса и специализации в периоде наблюдения.

Оценка частоты отказов 1 и 2 категории ОТИ выполняется по формуле:

$$\tilde{f}_{12} = \frac{\sum_{k=1}^G f_{12k}}{G}, \quad (2)$$

где G – количество лет в периоде наблюдения за ОТИ;
 f_{12k} – количество отказов 1 и 2 категории ОТИ в k -ом году наблюдения.

Таким образом, для вычисленного значения K_{r12} ОТИ по формуле (1) находится расчетное значение ущерба в виде потерь поезд-часов, а по формуле (2) – расчетная частота отказов 1 и 2 категории и по матрице (см. рис. 1) находят клетку с расчетным уровнем риска.

Заключение

Полученные результаты могут быть использованы при планировании мероприятий по управлению надежностью объектов транспортной инфраструктуры и адресного распределения ресурсов, а также для обоснования коэффициента надежности при оценке наличной пропускной способности участков железных дорог, коэффициента заполнения и ряде других эксплуатационных задач.

Библиографический список

1. Аношкин В.В., Горелик А.В., Поменков Д.М. и др. Реализация методологии УРРАН в хозяйстве автоматики и телемеханики // Автоматика, связь, информатика. 2017. № 6. С. 2-6.
2. Ерж А.Е., Горелик А.В., Солдатов Д.В. и др. Методология управления рисками в хозяйстве автоматики и телемеханики // Автоматика, связь, информатика. 2017. № 7. С. 2-6.

3. Шубинский И.Б., Новожилов Е.О. Метод нормирования показателей надежности объектов железнодорожного транспорта // Надежность. 2019. №4. С. 17-23. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-4-17-23

4. Малых А.Н. Оценка влияния отказов систем железнодорожной автоматики на наличную пропускную способность перегонов // Наука и техника транспорта. 2019. № 3. С. 15-17.

5. Горелик А.В., Дорохов В.С., Малых А.Н. и др. Статистическая оценка влияния отказов систем железнодорожной автоматики на наличную пропускную способность перегонов и станций // М.: РУТ(МИИТ), 2018. Деп. в ВИНТИ РАН 03.05.2018 №54-B2018.

6. Новожилов Е.О. Принцип построения матриц рисков // Надежность. 2015. №3. С. 73-86. DOI: 10.21683/1729-2646-2015-0-3-73-86

7. Дорохов В.С. Прогнозирование технических рисков при планировании производственных процессов эксплуатации объектов железнодорожной автоматики // Наука и бизнес: пути развития. 2019. № 8. С. 35-38.

Сведения об авторах

Александр Владимирович Горелик – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Системы управления транспортной инфраструктурой» Российского университета транспорта РУТ(МИИТ), Москва, Российская Федерация, тел. +7-495-649-19-00 (2-28), e-mail: agorelik@yandex.ru.

Александр Николаевич Малых – старший преподаватель Российского университета транспорта РУТ(МИИТ), Москва, Российская Федерация, тел. +7-495-649-19-00 (2-28), e-mail: aleksandr_malykh@mail.ru.

Александр Валерьевич Орлов – доцент Российского университета транспорта РУТ(МИИТ), Москва, Российская Федерация, тел. +7-495-649-19-00 (2-28), e-mail: suti.orlov@gmail.com.

Вклад авторов в статью

Горелик А.В. – анализ существующего состояния вопроса, определение направления исследования.

Орлов А.В. – сбор эмпирических данных и реализация способа статистической оценки влияния отказов на риски потерь поезд-часов.

Малых А.Н. – обработка эмпирических данных и разработка способа статистической оценки коэффициента готовности объектов транспортной инфраструктуры.

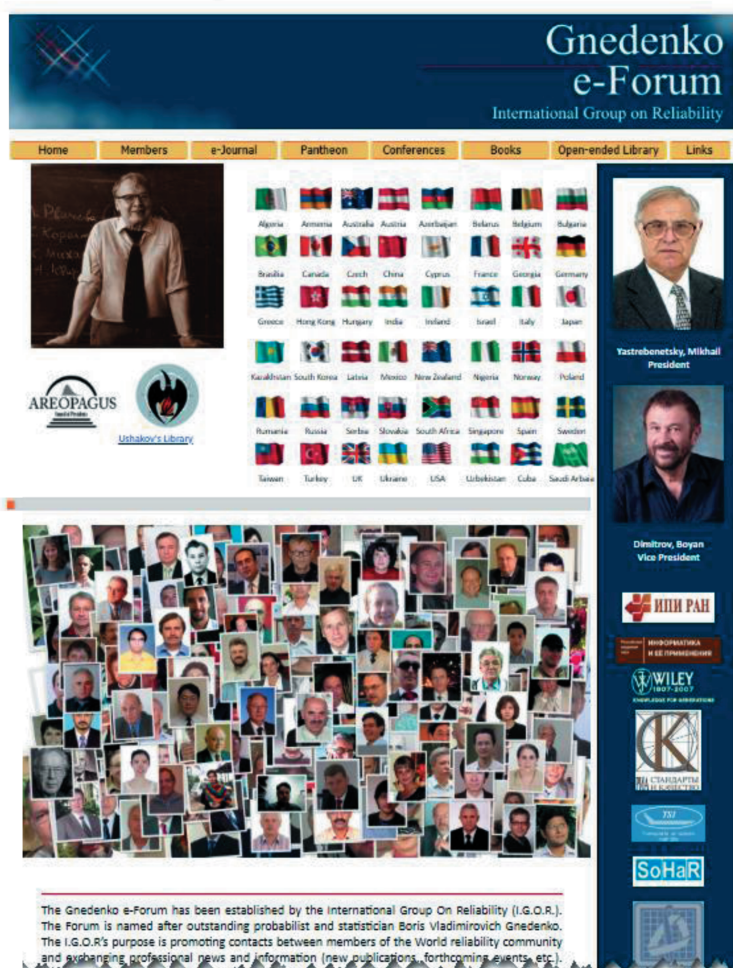
Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов



GNEDENKO FORUM

INTERNATIONAL GROUP ON RELIABILITY



Gnedenko Forum основан в 2004 году неофициальной международной группой экспертов в области теории надёжности для профессиональной поддержки исследователей всего мира, заинтересованных в изучении и развитии научных, технических и пр. аспектов теории надёжности, анализа рисков и безопасности в теоретической и прикладной областях.

Форум создан в сети Интернет как некоммерческая организация. Его цель – привлечь к совместному обсуждению и общению технических специалистов, заинтересованных в развитии теории надёжности, безопасности и анализа рисков, независимо от места их проживания и принадлежности к тем или иным организациям.

Форум выступает в качестве объективного и нейтрального лица, распространяющего научную информацию для прессы и общественности по вопросам, касающимся безопасности, анализа риска и надёжности сложных технических систем. Он опубликует обзоры, технические документы, технические отчеты и научные эссе для распространения знаний и информации.

Форум назван в честь Бориса Владимировича Гнеденко, выдающегося советского математика, специалиста в области теории вероятностей и её приложений, академика Украинской академии наук. Форум является площадкой для распространения информации о стипендиях, академических и профессиональных позициях, открывающихся в профессиональной области надёжности, безопасности и анализа рисков по всему миру.

В настоящее время в Форуме состоят 500 участников из 47 стран мира.

Начиная с января 2006 года, Форум выпускает свой ежеквартальный журнал *Reliability: Theory & Applications* (www.gnedenko.net/RTA). Журнал зарегистрирован в Библиотеке Конгресса США (ISSN 1932-2321) и публикует статьи, критические обзоры, воспоминания, информацию и библиографии на теоретические и прикладные аспекты надёжности, безопасности, живучести, технического обслуживания и методы анализа и управления рисками.

С 2000 года журнал индексируется в международной базе Scopus.



Членство в GNEDENKO FORUM не подразумевает никаких обязательств. Достаточно прислать по адресу a.bochkov@gmail.com свою фотографию и краткую профессиональную биографию (резюме). Образцы можно найти на <http://www.gnedenko.net/personalities.htm>

www.gnedenko.net

ТРЕБОВАНИЯ РЕДАКЦИИ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛАХ ИЗДАТЕЛЬСКОЙ ГРУППЫ IDT PUBLISHERS

Требования к формату статьи

Статья представляется в редакцию в электронном формате, в виде файла, созданного в текстовом редакторе MS Word из пакета Microsoft Office (файл с расширением *.doc или *.docx). Текст набирается черным шрифтом на листе формата А4 с полями: левое, верхнее, нижнее – 2 см; правое – 1,5 или 2 см. Минимальный объем статьи – 5 страниц, максимальный (может быть увеличен по согласованию с редакцией) – 12 страниц. При этом статья включает структурные элементы, описание которых представлено ниже.

Структура материала статьи

Представленные ниже структурные элементы статьи отделяются друг от друга *пустой строкой*. Отдельные примеры оформления, как это должно выглядеть в тексте, выделены *синим шрифтом*.

1) Название статьи

Название статьи представляется на русском и английском языках. Название статьи на русском языке должно соответствовать содержанию статьи. Англоязычное название должно быть грамотно с точки зрения английского языка, при этом по смыслу полностью соответствовать русскоязычному названию.

Оформление: Текст названия набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, межстрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «полужирный». Точка в конце не ставится.

Пример:

Повышение надежности электронных компонентов
The Increasing of dependability of electronic components

2) Фамилия И.О. автора (авторов)

Данный структурный элемент для каждого автора включает:

- на русском языке – его фамилию и инициалы, после которых указывается сноска в виде цифры, набранной верхним индексом (надстрочным), которая ссылается на указание места работы автора. У фамилии автора, который будет контактировать с редакцией, также верхним индексом (после цифры) указывается символ «*»;

- на английском языке – его фамилию, имя и отчество в формате «Имя, инициал отчества, фамилия» (Ivan I. Ivanov). Фамилию на английском языке необходимо указывать в соответствии с заграничным паспортом или так, как она была указана в ранее опубликованных статьях. Если автор не имеет заграничного

паспорта и/или публикаций, для транслитерации фамилии и имени необходимо использовать стандарт BSI.

Оформление: Текст ФИО набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, межстрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «полужирный». ФИО разделяются запятой, точка в конце не ставится.

Пример:

Иванова А.А.¹, Петров В.В.^{2*}

Anna A. Ivanova, Victor V. Petrov

3) Место работы автора (авторов)

Место работы авторов приводится на русском языке, перед указанием места набирается верхним индексом (надстрочным) соответствующая цифра сноски, указывающая на имя автора.

Оформление: Текст места работы набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, межстрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный». Каждое место работы – с новой строки, точки в конце не ставятся.

Пример:

¹Московский государственный университет, Российская Федерация, Москва

²Санкт-Петербургский институт теплоэнергетики, Российская Федерация, Санкт-Петербург

4) Адрес электронной почты автора, который будет вести переписку с редакцией

Оформление: Текст адреса набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, межстрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный», все символы – строчные. Перед адресом набирается символ сноски «*». Точка в конце не ставится.

Пример:

*petrov_vv@aaa.ru

5) Резюме статьи

Данный структурный элемент включает структурированную аннотацию статьи объемом не менее 350 слов и не более 400 слов. Резюме представляется на русском и английском языках. Резюме должно содержать (желательно в явной форме) следующие разделы: Цель; Методы; Результаты; Выводы (на англ. яз.: Objective, Methods, Results, Conclusion). В резюме статьи не следует включать впервые введенные термины, аббревиатуры (за исключением общеизвестных), ссылки на литературу.

Оформление: Текст резюме набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный», кроме слов «**Резюме.**», «**Цель.**», «**Методы.**», «**Выводы.**» («**Objective.**», «**Methods.**», «**Results.**», «**Conclusion.**»), которые (вместе с точкой) должны иметь начертание шрифта «полужирный». Текст резюме на отдельные абзацы не разделяется (набирается в один абзац).

Пример (на рус. яз.):

Резюме. Цель. Предложить подход ... с учетом современных методик. **Методы.** В статье применяются методы математического анализа, ..., теории вероятностей. **Результаты.** С использованием предложенного метода получено... **Заключение.** Предлагаемый в статье подход позволяет...

6) Ключевые слова

Указывается 5-7 слов по теме статьи. Желательно, чтобы ключевые слова дополняли резюме (аннотацию) и название статьи. Ключевые слова указываются на русском и английском языках.

Оформление: Текст набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный», кроме слов «**Ключевые слова:**» («**Keywords:**») которые (вместе с двоеточием) должны иметь начертание «полужирный». Текст на отдельные абзацы не разделяется (набирается в один абзац). В конце ставится точка.

Пример (на рус. яз.):

Ключевые слова: надежность, функциональная безопасность, технические системы, управление рисками, производственная эффективность.

7) Текст статьи

Рекомендуется структурировать текст статьи в виде следующих разделов: Введение, Обзор источников, Методы, Результаты, Обсуждение, Заключение (или выводы). Рисунки и таблицы включаются в текст статьи (положение рисунков должно быть «в тексте», а не «за текстом» или «перед текстом»; без «обтекания текстом»).

Оформление:

Заголовки разделов набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, с абзацным отступом слева 1,25 см. Начертание шрифта «полужирный». Заголовки разделов (кроме введения и заключения (выводов)) могут иметь нумерацию арабскими цифрами с точкой после номера раздела. Номер с точкой отделяются от заголовка неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar).

Текст разделов набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, с абзацным отступом слева 1,25 см. Начертание шрифта «обычный» Текст разде-

лов разделяется на отдельные абзацы. Абзацный отступ не применяется для абзаца, следующего за формулой и содержащего пояснения к формуле, например:

где n – количество изделий.

Пример:

1. Состояние вопроса повышения надежности электронных компонентов

Проведенный анализ отечественной и зарубежной литературы по теме исследования показал, что...

Рисунки (фотографии, скриншоты) должны быть хорошего качества, пригодные для печати. Разрешение рисунка – не хуже 300 dpi. Если рисунок представляет собой схему, диаграмму, чертеж и т.п., то желательно вставлять такой рисунок в текст в редактируемом формате (MS Visio). Все рисунки должны иметь подрисовочные подписи. Рисунки нумеруются арабскими цифрами, по порядку следования в тексте. Если рисунок в тексте один, то он не нумеруется. Отсылки на рисунки оформляются следующим образом: «На рис. 3 указано, что ...» или «Указано, что ... (см. рис. 3)». Сокращение «рис.» и номер рисунка (если он есть) всегда разделяются неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar). Подрисовочная подпись включает порядковый номер рисунка и его название. Располагается на следующей строке после рисунка и выравнивается по центру:

Рис. 2. Описание жизненно важных процессов

Точка после подрисовочной подписи не ставится. При выравнивании по центру абзацный отступ всегда должен отсутствовать! Все обозначения, приведенные на рисунках, необходимо пояснять в основном или подрисовочном тексте. Недопустимы отличия в обозначениях на рисунках и в тексте (включая различие прямых/наклонных символов). При проблемах с версткой рисунков, вставленных в текст, авторы должны по запросу редакции предоставить данные рисунки в графическом формате, в виде файлов с расширениями *.tiff, *.png, *.gif, *.jpg, *.eps.

Таблицы должны быть хорошего качества, пригодные для печати. Таблицы должны быть пригодны для редактирования (а не отсканированные или в виде рисунков). Все таблицы должны иметь заголовки. Таблицы нумеруются арабскими цифрами, по порядку следования в тексте. Если таблица в тексте одна, то она не нумеруется. Отсылки на таблицы оформляются следующим образом: «В табл. 3 указано, что ...» или «Указано, что ... (см. табл. 3)». Сокращение «табл.» и номер таблицы (если он есть) всегда разделяются неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar). Заголовок таблицы включает порядковый номер таблицы и ее название. Располагается на строке, предшествующей таблице и выравнивается по центру:

Табл. 2. Описание жизненно важных процессов

Точка после заголовка таблицы не ставится. При выравнивании по центру абзацный отступ всегда должен отсутствовать! Все обозначения (символы), приведен-

ные в таблицах, необходимо пояснять в основном тексте. Недопустимы отличия в обозначениях в таблице и в тексте (включая различие прямых/наклонных символов).

Математические обозначения в тексте набираются заглавными и строчными буквами латинского, греческого и русского алфавитов. Латинские символы всегда набираются наклонным шрифтом (курсивом), кроме обозначений функций, таких как $\sin$, $\cos$, $\max$, $\min$ и т.п., которые набираются прямым шрифтом. Греческие и русские символы всегда набираются прямым шрифтом. Размер шрифта основного текста и математических обозначений (включая формулы) должен быть одинаков; верхние и нижние индексы масштабируются в MS Word автоматически.

Формулы могут быть включены непосредственно в текст, например:

Пусть $y = a \cdot x + b$, тогда...

либо набираться в отдельной строке, с выравниванием по центру, например:

$$y = a \cdot x + b.$$

При наборе формул как в тексте, так и в отдельной строке, знаки препинания должны ставиться по обычным правилам – точка, если формулой заканчивается предложение; запятая (или отсутствие знака препинания), если предложение после формулы продолжается. Для разделения формулы и текста рекомендуется для строки с формулой устанавливать вертикальные отступы (6 пт перед, 6 пт после). Если в тексте статьи делается отсылка на формулу, то такая формула обязательно набирается отдельной строкой, по правому краю которой указывается номер формулы в круглых скобках, например:

$$y = a \cdot x + b. \quad (1)$$

Если формула набирается в отдельной строке и имеет номер, то данная строка выравнивается по правому краю, а формула и номер разделяются знаком табуляции; позиция табуляции (в см) выбирается таким образом, чтобы формула располагалась примерно по центру. Формулы, на которые в тексте делается отсылка, нумеруются арабскими цифрами, по порядку следования в тексте.

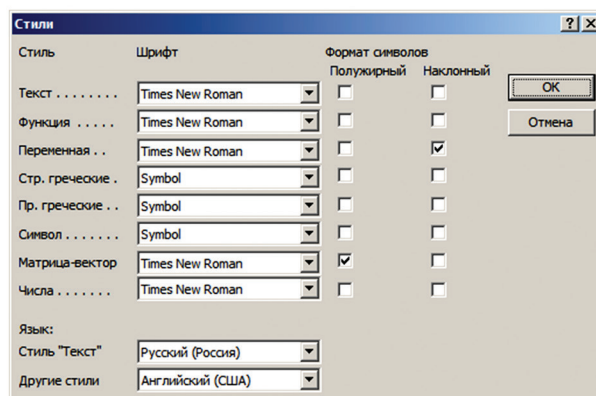
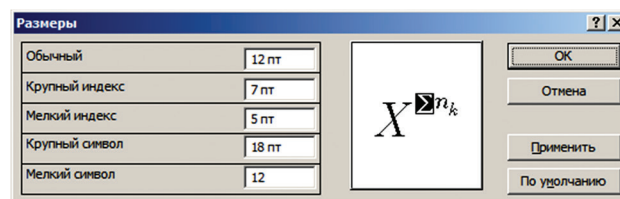
Простые формулы следует набирать без применения формульного редактора (использовать в MS Word русские и латинские буквы, а также меню «Вставка» + «Символ», если требуются греческие буквы и математические операторы), с соблюдением требуемого наклона для латинских символов, например:

$$\Omega = a + b \cdot \theta.$$

Если формула набирается без применения редактора формул, то между буквами и знаками «+», «-», «=» должны быть набраны неразрывные пробелы (Ctrl+Shift+Spacebar).

Сложные формулы набираются с применением редактора формул. Для отсутствия проблем с редак-

тированием формул и их версткой настоятельно рекомендуется использовать редакторы Microsoft Equation 3.0 или MathType 6.x. Для обеспечения корректного ввода формул (размер символов, их наклон и т.д.) рекомендуемые настройки редактора приведены на рисунках ниже.



При наборе формул в редакторе формул, если требуются скобки, то следует использовать скобки из формульного редактора, а не набирать их на клавиатуре (для корректной высоты скобок в зависимости от содержимого формулы), например (Equation 3.0):

$$Z = \frac{a \cdot \left(\sum_{i=1}^n x_i + \sum_{j=1}^m y_j \right)}{n + m}. \quad (2)$$

Сноски в тексте нумеруются арабскими цифрами, размещаются постранично. В сносках могут быть размещены: ссылки на анонимные источники в сети Интернет, ссылки на учебники, учебные пособия, ГОСТы, статистические отчеты, статьи в общественно-политических газетах и журналах, авторефераты, диссертации (если нет возможности процитировать статьи, опубликованные по результатам диссертационного исследования), комментарии автора.

Отсылка на библиографический источник указывается в тексте статьи в квадратных скобках, а источники приводятся в библиографическом списке в порядке их упоминания в тексте (затекстовые ссылки). Страница указывается внутри скобок, через запятую и пробел после номера источника: [6, с. 8]

8) Благодарности

В этом разделе указываются все источники финансирования исследования, а также благодарности людям, которые участвовали в работе над статьей, но не

являются ее авторами. Участие в работе над статьей подразумевает: рекомендации по совершенствованию исследования, предоставление пространства для исследования, ведомственный контроль, получение финансовой поддержки, одиночные виды анализа, предоставление реагентов/пациентов/животных/прочих материалов для исследования.

Оформление:

Сведения набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный».

9) Библиографический список

В библиографический список включаются только рецензируемые источники (статьи из научных журналов и монографии), упоминающиеся в тексте статьи. Нежелательно включать в библиографический список авторефераты, диссертации, учебники, учебные пособия, ГОСТы, информацию с сайтов, статистические отчеты, статьи в общественно-политических газетах, на сайтах и в блогах. Если необходимо сослаться на такую информацию, следует поместить информацию об источнике в сноску.

При описании источника следует указывать его DOI, если удастся его найти (для зарубежных источников удастся это сделать в 95% случаев).

Ссылки на принятые к публикации, но еще не опубликованные статьи должны быть помечены словами «в печати»; авторы должны получить письменное разрешение для ссылки на такие документы и подтверждение того, что они приняты к печати. Информация из неопубликованных источников должна быть отмечена словами «неопубликованные данные/документы», авторы также должны получить письменное подтверждение на использование таких материалов.

В ссылках на статьи из журналов должны быть обязательно указаны год выхода публикации, том и номер журнала, номера страниц.

В описании каждого источника должны быть представлены все авторы.

Ссылки должны быть верифицированы, выходные данные проверены на официальном сайте журналов и/или издательств.

Оформление:

Оформление ссылок (в русскоязычной версии журнала) должно выполняться по ГОСТ Р 7.0.5-2008. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления.

Библиографические ссылки набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, с абзацным отступом слева 1,25 см. Начертание шрифта «обычный» (см. примеры оформления в ГОСТ Р 7.0.5). Каждая

запись имеет нумерацию арабскими цифрами с точкой после номера раздела. Номер с точкой отделяются от записи неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar).

10) Сведения об авторах

Фамилия, имя, отчество полностью (на русском и английском языках); полный почтовый адрес (включая индекс, город и страну); полное наименование места работы, занимаемая должность; ученая степень, ученое звание, почетные звания; членство в общественных союзах, организациях, ассоциациях и т.д.; официальное англоязычное название учреждения (для версии на английском языке); адрес электронной почты; перечень и номера журналов, в которых ранее публиковались статьи автора; фото авторов для публикации в журнале.

Оформление:

Сведения набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный».

11) Вклад авторов в статью

Следует указать подробно, каким из авторов что сделано в статье. Например: Автором А. выполнен анализ литературы по теме исследования, автором Б. разработана модель объекта в реальных условиях эксплуатации, выполнен расчет примера и т.д. Даже если у статьи один автор, то требуется указание его вклада.

Оформление:

Сведения набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный».

12) Конфликт интересов

Конфликт интересов – это условия, при которых у людей возникают вступающие в конфликт или конкурирующие интересы, способные повлиять на принятие редакторского решения. Конфликты интересов могут быть потенциальными или осознанными, а также реально существующими. На объективность могут повлиять личные, политические, финансовые, научные или религиозные факторы.

Автор обязан уведомить редакцию о реальном или потенциальном конфликте интересов, включив информацию о конфликте интересов в статью.

Если конфликта интересов нет, автор должен также сообщить об этом. Пример формулировки: «Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов».

Оформление:

Текст набирается шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, без абзацного отступа слева. Начертание шрифта «обычный».

ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ ПРИ УЧАСТИИ И ПОДДЕРЖКЕ

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



АО «НИИАС» – ведущее предприятие ОАО «РЖД» в области создания комплексов и систем обеспечения безопасности движения, управления движением, геоинформационного обеспечения, мониторинга состояния подвижного состава и инфраструктуры железных дорог



Цели:

- ☐ эффективность,
- ☐ безопасность
- ☐ надежность перевозок



Основные направления деятельности

- Интеллектуальные системы управления
- Технологии управления перевозками и транспортного обслуживания
- Системы автоматики и телемеханики
- Центры автоматизированного управления
- Информационные системы
- Геоинформационные системы и спутниковые технологии
- Системы транспортной безопасности
- Системы управления инфраструктурой
- Системы управления топливно-энергетическими ресурсами
- Испытания, сертификация и экспертиза
- Информационная безопасность
- Нормативно-правовое обеспечение



www.vniias.ru