

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)

Ответственный секретарь:

Замышляев Алексей Михайлович – доктор технических наук, заместитель Генерального директора АО «НИИАС» (Москва, РФ)

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 17.09.2021
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

Системный анализ в задачах надежности и безопасности

Похабов Ю.П. О надежности высокоответственных невосстанавливаемых изделий космического назначения с малой наработкой на примере механических устройств одноразового срабатывания	3
Чепурко В.А., Черняев А.Н. Методика оценки объема ЗИП с неснижаемым уровнем	13
Белоусова М.В., Булатов В.В., Смирнов Н.В. Оценка параметра потока отказов вагонокомплекта дверей пассажирского поезда	20
Жарков М.Л., Павидис М.М. Моделирование сортировочных станций железнодорожной сети методами теории массового обслуживания	27

Дискуссия по терминологии надежности

Зеленцов Б.П. Использование терминов «оценка» и «определение» в стандартах по надежности	35
---	----

Безопасность Управление рисками. Теория и практика

Грачев Я.Л., Сидоренко В.Г. Стегоанализ методов скрытия информации в графических контейнерах	39
Брабанд Й, Шебе Х. Модель риска немецкого приложения для предупреждения короны – перезагрузка	47
Проневич О.Б., Зайцев М.В. Интеллектуальные методы повышения точности прогнозирования редких опасных событий на железнодорожном транспорте	54
Памяти Замышляева А.М.	65
Гнеденко – Форум	66

О надежности высокоответственных невосстанавливаемых изделий космического назначения с малой наработкой на примере механических устройств одноразового срабатывания

Юрий П. Похабов, Акционерное общество «НПО ПМ – Малое Конструкторское Бюро» (АО «НПО ПМ МКБ»), Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация
pokhabov_yury@mail.ru



Юрий П. Похабов

Резюме. Цель. Рассмотреть вопросы обеспечения надежности высокоответственных невосстанавливаемых изделий космического назначения с малой наработкой, отказы которых определяются главным образом конструкторскими и технологическими ошибками и несоблюдением условий бездефектного производства при единичном или мелкосерийном изготовлении, а также определить методологический подход к обеспечению требуемой их безотказности. **Методы.** Проведен анализ вариантов повышения надежности изделий с малой наработкой на примере механических устройств одноразового срабатывания при использовании статистических подходов современной теории надежности, специальных методов обеспечения надежности механических подвижных узлов, методологии FMEA-анализа, концепции Stage-Gate и проведении наземной экспериментальной отработки на единичных отработочных макетах для каждого вида воздействий. **Результаты.** Сделан вывод о необходимости проведения дополнительных процедур по прогнозированию, смягчению и (или) исключению возможных отказов в процессе конструирования на основе точно таких же подходов, которые и приводят к отказам – конструкторских и технологических. Конструкторско-технологические подходы к надежности основаны на раннем выявлении возможных причин отказов, что требует выполнения квалифицированного и системного анализа по определению функциональности, работоспособности и надежности изделия с учетом критичных выходных параметров и вероятностных показателей, влияющих на выполнение требуемых функций с допустимой вероятностью отказов. Решение такой задачи осуществляют с использованием обобщенной параметрической модели функционирования и методики проведения конструкторско-технологического анализа надежности. **Заключение.** Для высокоответственных невосстанавливаемых изделий космического назначения с малой наработкой требования безотказности разумно рассматривать главным образом с позиций финансово-экономических, безопасностных и имиджевых рисков утраты космических аппаратов. С точки зрения инженера-конструктора число девяток после запятой (с учетом округления до меньшего числа девяток для повышения достоверности) следует воспринимать как индикатор для применения соответствующих подходов к обеспечению требуемой безотказности при разработке изделия. При двух заданных девятках после запятой вполне приемлемо использовать методики аналитической и экспериментальной верификации, принятые в ракетно-космической отрасли, – выполнение расчетов надежности статистическими методами современной теории надежности и параметров работоспособности, использование методологии FMEA-анализа и концепции Stage-Gate, проведение наземной экспериментальной отработки на единичных отработочных макетах для каждого вида воздействий. При увеличении числа требуемых девяток целесообразно дополнительно применять методики раннего предупреждения отказов, одной из которых является конструкторско-технологический анализ надежности, дающий возможность конструктору принимать обоснованные технические решения на основе инженерных дисциплин и конструкторско-технологических способов обеспечения качества и надежности. Выбор одной из двух указанных стратегий обеспечения надежности определяется исключительно осознанием и пониманием разработчиком потенциальных опасностей, что дает возможность управлять рисками возникновения возможных редких отказов либо обоснованно отказаться от такой возможности.

Ключевые слова: расчет надежности, концепция Stage-Gate, FMEA-анализ, подвижные механические узлы, устройства одноразового срабатывания, космический аппарат, конструкторско-технологический анализ надежности (КТАН).

Для цитирования: Похабов Ю.П. О надежности высокоответственных невосстанавливаемых изделий космического назначения с малой наработкой на примере механических устройств одноразового срабатывания // Надежность. 2021. № 3. С. 3-12. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-3-3-12>

Поступила 26.05.2021 г. / После доработки 15.07.2021 г. / К печати 17.09.2021 г.

Введение

Конфигурация современных космических аппаратов (КА) в процессе выведения претерпевает четыре изменения кинематических состояний [1]:

1) эксплуатация в составе ракеты-носителя с компактными сложными конструкциями в стартовом положении (спутник консольно установлен на ракете, а его складные конструкции уложены в заданный объем и закреплены на корпусе);

2) отделение от средств выведения и орбитальный полет со складными конструкциями в стартовом положении (спутник отсоединен и отведен от ракеты на безопасное расстояние, но его конструкции остаются уложенными и закрепленными на корпусе до завершения фазы подготовки к раскрытию);

3) раскрытие конструкций при помощи механических устройств из стартового положения в рабочее (механические связи с корпусом сняты и элементы конструкции совершают предписанные движения, занимая заданное консольное положение относительно корпуса);

4) работа бортовых систем и оборудования спутника по целевому назначению в течение заданного срока активного существования с раскрытыми конструкциями в рабочем положении.

Указанная последовательность изменения состояний спутника определяется условиями и ограничениями по его доставке на околоземную орбиту многоступенчатыми ракетами [2]. Только после того, как все механизмы сработают: отделить и развернуть складные конструкции в заданную конфигурацию, КА получает возможность нормального функционирования на орбите. В противном случае все усилия по созданию и запуску ракеты-носителя с КА теряют свою эффективность, а иногда и смысл.

Механизмы космического назначения являются невосстанавливаемыми системами, поэтому цена отказов при отделении от ракеты-носителя и раскрытии механических устройств – это частичная или полная потеря функциональности КА еще до начала выполнения задач, ради которых он создается и запускается [3]. Как показывает история космических запусков, отказы механических устройств одноразового срабатывания являются не такими редкими событиями; так, доля отказов при развертывании спутника может составлять до 10,05%, а при отделении от ракет-носителей – 12,8% [4]. При этом практически каждый раз спутнику наносится ущерб различной степени тяжести (за исключением случаев самораскрытия после возникновения отказов из-за тепловых эффектов, например, при развертывании антенн на Кику 8). Так, три месяца спиновых маневров после нераскрытия антенны С-диапазона на спутника Anik E2 привели к перерасходу топлива, соответствующему году штатной работы на орбите. Неполное раскрытие крыльев солнечных батарей на Telstar 14, Telstar 14R и Intelsat 19 вызвало дефицит электроэнергии, что послужило причиной принудительного отключения части приемопередающих устройств полезной нагрузки

(например, на Telstar 14R были отключены 17 транспондеров из 41). Из-за нераскрытия солнечных батарей погибли спутники Sinosat 2 стоимостью \$190 млн и Chinasat 18 – \$250 млн, так и не начав свою работу по целевому назначению. Ежегодно в мире происходит минимум 1–2 отказа механических устройств одноразового срабатывания при отделении и раскрытии на орбитальном участке полета КА, а средняя вероятность отказов доходит до 0,004 в год [5]. В то же время, безотказность механизмов раскрытия и фиксации согласно ОСТ 92-4339 должна быть не ниже 0,999 с доверительной вероятностью 90%, а точечное значение вероятности срабатывания механических устройств для современных аппаратов длительного функционирования задается не менее 0,9995 [6–8].

Выводы простые и неутешительные. За более чем 60-летнюю историю космонавтики так и не появилось научно-обоснованных методик разработки и создания механизмов одноразового срабатывания с требуемой безотказностью. Причем даже продолжительное (за последние 20–30 лет) отсутствие отказов у отдельных разработчиков механизмов отделения и раскрытия не может рассматриваться как бесспорное свидетельство безошибочности методов обеспечения надежности из-за малых выборок статистических данных. В частности, при требуемой безотказности механических устройств выше 0,9995, безаварийный запуск до 10 аппаратов в год (максимум – около 300 шт. за 30 лет), что соответствует плановому объему производства одного из крупнейших отечественных разработчиков, сам по себе не дает никаких гарантий достижения безотказности на уровне 0,9995 даже с доверительной вероятностью 15% [5, 9, 10]. Это при том, что на потерю работоспособности механизмов одноразового срабатывания практически не оказывают влияния такие причины неопределенности, как старение и деградация материалов и соединений в результате длительного воздействия факторов космического пространства. В большинстве случаев наработка до отказа таких изделий является минимальной – это время выведения на орбиту и раскрытия из стартового положения, которое в сумме не превышает десятков минут и повторного срабатывания на орбите не предполагается [5, 8]. Соответственно, отказы механических устройств определяются главным образом конструкторскими и технологическими ошибками и несоблюдением условий бездефектного производства при единичном и (или) мелкосерийном изготовлении [5, 11–14]. Предупреждение¹ таких отказов зависит главным образом от степени обоснованности и установления необходимых и достаточных требований в конструкторской документации для изготовления и

¹ Предупреждение отказов: Реализация в процессе создания (модернизации), производства и эксплуатации изделий совокупности организационно-технических мероприятий, обеспечивающих профилактику, выявление, исследование и устранение причин отказов изделий [ОСТ 134-1012–97, раздел 4].

обеспечения соответствующего контроля значений ключевых характеристик критичных элементов на всех стадиях жизненного цикла [15].

В свете указанных обстоятельств рассмотрим варианты повышения надежности высокоответственных невосстанавливаемых изделий с малой наработкой и один из методологических подходов к обеспечению требуемой безотказности функционирования механических устройств КА одноразового срабатывания.

Возможности современной теории надежности

Во-первых, буквально все нормативные документы и научно-методическая литература требуют проводить расчеты надежности на базе известной из опыта ненадежности – апостериорных знаний о возможных отказах [16, 17]. Считается, что для расчета надежности необходимо исходить из презумпции отказов, которые якобы не могут не произойти по определению, поэтому для проведения расчетов надежности следует знать статистическую вероятность отказов изделия в целом или, по крайней мере, фактическую ненадежность его компонентов и элементов в заданных режимах и условиях применения [18]. Если известных показателей надежности (а фактически – ненадежности) не существует, то по канонам современной теории надежности их следует наработать статистическими методами [19–21]. По-другому не позволяют требования стандартов, например, ГОСТ 27.002¹, ГОСТ 27.301, ГОСТ РО 1410-001 и т. п.

Во-вторых, применительно к механическим устройствам одноразового срабатывания КА для обеспечения безотказности, например, 0,9995 необходимо провести не менее 9995 независимых испытаний (опытов) в однородных условиях. Другими словами, согласно нормативным документам необходимо раскрыть на орбите (не при наземных испытаниях, иначе не обеспечится условие однородности выборки) не менее 9995 механических устройств (не испытаний одного устройства 9995 раз, иначе нарушается условие независимости испытаний), и все это только для того, чтобы подтвердить, что однократное штатное раскрытие произойдет с требуемой надежностью. Допустим, что безотказность 0,9995 достаточно обеспечить с доверительной вероятностью 0,9, но и тогда число независимых испытаний в однородных условиях не должно быть меньше 4605 [22] (см. пример в ГОСТ Р 27.003 для определения минимального объема статистических испытаний при заключении контрактов в части надежности). Если воспользоваться методом расчета надежности по известным показателям надежности компонентов и элементов, то статистических испытаний в условиях космического пространства потребуется значительно больше, чем для самих механических устройств, поскольку те состоят из десятков и

сотен составных частей в виде простейших механизмов и устройств, число требований к надежности которых растет экспоненциально числу функциональных элементов, влияющих на общую надежность системы [23]. Очевидно, что получить достоверные данные для расчета надежности высокоответственных механических устройств статистическими методами современной теории надежности практически невозможно по финансово-экономическим соображениям (в 2018 г. запуск 1 кг груза стоил \$20–30 тыс., на 2020 г. – \$15–17 тыс. [24]).

В-третьих, у человечества просто физически нет объектов-аналогов, необходимых для расчета надежности механических устройств с безотказностью близкой к 0,9999. Общее число успешно запущенных спутников в мире за период 1958–2010 гг. составляет 6264 [25]. За период 2011–2016 гг. добавилось еще 1153 КА [5]. Даже если закрыть глаза на условие однородности выборки, то все равно невозможно полагаться на достоверность статистических данных для расчетов безотказности раскрытия, например, солнечных батарей на уровне 0,9995 (которые есть практически на каждом спутнике).

В-четвертых, в ракетно-космической отрасли принято считать, что изделия, получившие летную квалификацию, являются надежными [9]. Однако высокие требования к показателям надежности при малом объеме выборки не соотносятся со статистическими подходами современной теории надежности. Отказ, который допустим, например, на 10000 испытаний (опытов), может произойти в момент проведения любого по счету испытания, и если, положим, 100 испытаний подряд прошли успешно, то не факт, что 101-е испытание не завершится отказом. В этом случае допустимо говорить о том, что 100 раз подряд изделие подтвердило свою работоспособность (но, ни в коем случае, не давать заключений, касающихся надежности). Поэтому без научно-методического обоснования возможности достижения требуемой безотказности (т. е. без проведения дополнительных анализов и/или моделирования, подтверждающих выполнение требуемых функций без отказов) делать какие-либо выводы о надежности высокоответственных изделий при малой наработке с инженерной точки зрения попросту опрометчиво.

Таким образом, использование только лишь статистических подходов современной теории надежности недопустимо для обеспечения высоконадежного функционирования механических систем одноразового срабатывания. Очевидно, что в данном случае необходимо выявлять прежде всего причины, а не следствия (статистику) отказов. Соответственно, требуются методики проведения инженерного анализа и расчета надежности, основанные на физических явлениях, которые описываются физическими теориями, на базе чего должны быть построены математические модели потери (или сохранения) работоспособности объекта при изменении его внутреннего состояния в заданных режимах и условиях применения [26].

¹ См. термины, касающиеся методов определения надежности [статьи 3.7.9–3.7.11].

Специальные методы обеспечения надежности механических устройств одноразового срабатывания

Методика расчета надежности механических частей подвижных конструкций КА впервые опубликована в 1978–1979 гг. [27, 28]. Дополнительно к расчету прочностной надежности был предложен расчет функциональной надежности, основанный на определении вероятности превышения движущих моментов (сил) приводов (актуаторов) над резистентными моментами (силами) на пути движения исполнительных частей механизма, а также расчет суммарной надежности механизмов (прочностной и функциональной) на основе модели фиктивных элементов (агрегатов) [28]. В дальнейшем расчет функциональной надежности механизмов стали проводить с учетом запасов движущих моментов (сил) [29–33] по аналогии с детерминированными расчетами на прочность по установленным коэффициентам безопасности и запасам прочности [34]. За рубежом выполнение требований по запасам движущих моментов (сил) является неотъемлемой частью всех стандартов проектирования подвижных механических узлов («Moving mechanical assemblies», MMA) ракетно-космического назначения. Нормативные значения запасов движущих моментов (сил) с 1975 г. установлены в военном стандарте MIL-A-83577, а позднее – гражданских стандартах AIAA S-114–2005, NASA-STD-5017A и ECSS-E-ST-33-01C. В нашей стране не существует официальных стандартов (ГОСТ, ГОСТ Р, ОСТ, СТП, СТО) по проектированию механических устройств с учетом запасов движущих моментов (сил), но сложившаяся годами практика применения такова, что выбор приводов раскрытия производят исходя из условий обеспечения запасов движущих моментов (сил) не менее 100 % (соотношение 2:1) к худшему значению резистивных моментов (сил) в любой точке траектории движения механизма из расчета нулевой кинетической энергии [32, 33]. Принято считать, что при соблюдении установленных коэффициентов безотказности, запасов прочности и движущих моментов (сил) и условий успешного подтверждения критериев экспериментальной отработки (согласно определению термина «экспериментальная отработка» по ГОСТ Р 58630), заданная безотказность раскрытия и фиксации механических устройств обеспечивается по умолчанию [29–31].

Тем не менее, исследования реальных причин отказов показывают, что в подавляющем большинстве случаев они имеют редкий характер, определяемый неблагоприятным сочетанием допусков на изготовление, неучтенными факторами технологической наследственности, режимов применения и внешних воздействий [5, 15]. Такие отказы могут быть вызваны, например, внезапным исчезновением зазоров в кинематических парах (Кику 8, Союз ТМА-17М), неблагоприятным сочетанием производственных факторов (Intelsat 19), технологическими дефектами (Канопус-СТ, Прогресс М-19М), попаданием

в механизм раскрытия посторонних предметов (Skylab, Telstar 14, Telstar 14R), отказами приводов раскрытия (EchoStar 4), несанкционированным раскрытием (Ресурс-П № 3), конструкторско-технологическими ошибками (Маяк), холодной сваркой (Galileo) и т. п. Практика показывает, что расчеты надежности статистическими методами современной теории надежности и параметров работоспособности (из рекомендуемого перечня номенклатуры расчетов по ОСТ 92-0290), а также успешное проведение наземной экспериментальной отработки на единичных отработочных макетах для каждого вида воздействий не способны предотвратить риски возникновения редких отказов [16, 35]. Современные методы экспериментальной отработки не предназначены для выявления и эмулирования расчетных случаев, которые соответствуют критичным сочетаниям предельных состояний изделия, факторов режимов и внешних воздействий [5]. Причем для малых вероятностей отказов (не более 0,01) суммарная ошибка при оценке надежности по результатам экспериментальной отработки может достигать не менее порядка величины значащей цифры, при том, что для инженерных расчетов считается приемлемой ошибка не более $5 \div 10\%$ [5, 36–38].

Концепция Stage-Gate

В соответствии с концепцией Stage-Gate, реализация любого проекта¹ определяется последовательным выполнением кросс-функциональных действий и мероприятий (stage), отделенных друг от друга точкам принятия решений (gate) для перехода к последующему этапу плана проведения работ (в системе stage-gate) [39].

Фактически идет речь о процессных стандартах управления проектами, которые, в отличие от принятых в отечественной практике стандартов требований (ГОСТ, ГОСТ Р, ОСТ, СТП, СТО), устанавливают порядок и процедуры принятия надлежащих решений и осуществления необходимых действий. В частности, по процессному принципу разработаны стандарты ЕКА, предназначенные для управления, инженерных разработок и гарантии качества в космических проектах, например, для космических механизмов – ECSS-E-ST-33-01C.

При очевидной пользе процессных стандартов, основанных на концепции Stage-Gate, – доступности использования инженерами «средней» квалификации для достижения требуемого качества и надежности, когда все их решения и действия регламентированы набором заранее установленных (причем, не ими) процедур, слепое исполнение формализованных предписаний способно привести к утрате физического смысла решений и целеполагания действий. К примеру, при разработке механизма какого-либо конкретного принципа действия – процессные стандарты безусловно полезны, но при изменении физических принципов работы механизма

¹ Проект: Временное предприятие, направленное на создание уникального продукта, услуги или результата [Руководство РМВОК, глоссарий].

необходимо своевременно скомпенсировать изъяны используемых процедур в стандартах. Этого можно достичь за счет применения инженерных методик на основе строго определенных алгоритмизированных процедур либо эвристик инженеров. В первом случае – это быстрый путь подстройки существующей инженерной методики, во втором – относительно долгий путь проб и ошибок, связанный с накоплением и обобщением закономерностей поведения новых изделий для обеспечения требуемых свойств [40].

Методология FMEA-анализа

Цель разработки метода анализа видов и последствий отказов (FMEA, российский аналог – АВПО) заключается в обнаружении и устранении технических проблем в сложных системах путем изучения каждого вида отказа любого критичного компонента. FMEA-анализ и его разновидности: DFMEA, PFMEA и MFMEA основаны на мозговом штурме или экспертном оценивании видов и последствий отказов критичных элементов, к которым в случае необходимости добавляют анализ критичности отказов для оценки безопасности (FMECA, российский аналог – АВПКО), или анализ интенсивности отказов на основе статистических данных для оценки надежности (FMEDA).

Методика проведения FME[C,D]A-анализа предусматривает следующие шаги:

- определение структуры анализируемого объекта (структурный анализ);
- определение возможных критичных сценариев событий (функциональный анализ);
- непосредственное выполнение процедур анализов для определения видов, последствий и причин отказов с оценкой риска для проведения предупреждающих или корректирующих действий (FMEA), вычисления на основе FMEA-анализа показателей безопасности – числа приоритетности риска или критичности отказа (FMECA), нахождения по результатам FME[C]A-анализа частоты (интенсивности) отказов (FMEDA) для расчета надежности;
- оценка и документирование результатов анализов (FMEA, FMECA или FMEDA).

FME[C,D]A-анализы выполняет межфункциональная команда из специалистов различного профиля (например, конструктор, технолог, сборщик, испытатель, контролер и т. п.) численностью до 7–8 человек, имеющая практический опыт и высокий профессиональный уровень [41]. Принципы формирования и организации работ FMEA-команд определены стандартами и руководящими документами, например, ГОСТ Р 51814.2, СТБ 1506, РД 03-418-01 и др.

FMEA-анализ и его расширенные модификации (FMECA, FMEDA) выполняют эксперты, работающие по формализованным алгоритмам и процедурам для получения субъективных полуколичественных оценок (на основе рейтингов значимости последствий, вероятности

возникновения и обнаружения) потенциальных отказов (неисправностей). При этом эксперты обычно имеют разный профессиональный взгляд на анализируемый объект, который не всегда соответствует пониманию того, как именно и в каких условиях этот объект работает [42]. Эксперты не знают (причем стандарты FMEA не обязывают их это знать) конструкторского замысла, направленного на решение конкретных технических задач, поэтому оценку последствий дефектов оценивают на основании внешних признаков (показателей), заметных потребителю, и понятных им с точки зрения личных профессиональных качеств (знаний, квалификации и опыта).

Между тем, замысел конструктора самым тесным образом связан с установлением и обоснованием выходных параметров критичных элементов объекта в допустимой области изменения их значений [17, 36, 37]. Причем, если стандарты FMEA-анализа (например, ГОСТ Р 51814.2) еще предписывают определять виды потенциальных отказов на языке физических и технических терминов (трещина, деформация, заедание, разрушение, утечка и т. д.), то последствия отказов рекомендуется описывать в терминах потребителя (то, что он может заметить или испытать), например, шум, неправильная работа, неустойчивость, прерывистая работа и проч. [43]. С выходными параметрами и их допустимыми диапазонами, которые так или иначе устанавливает конструктор, результаты FMEA-анализа никак не связаны либо соотносятся опосредованно.

Подход к обеспечению надежности механических устройств одноразового срабатывания

В условиях, когда методы современной теории надежности не позволяют с допустимой точностью решать задачи надежности высокоответственных изделий при малой наработке из-за неприменимости статистических подходов, а специальные и вспомогательные методы не предназначены для выявления причин и оценки рисков возникновения редких отказов, остается только прогнозировать, смягчать или исключать возможные отказы в процессе конструирования на основе точно таких же подходов, которые и приводят к отказам – конструкторских и технологических.

Если исходить из принципов рационального конструирования, то конструкцию¹ и любой из ее конструктивных элементов необходимо рассматривать с позиций выполнения ими строго определенных функций, которые изначально задуманы и реализованы

¹ Конструкция: Устройство, взаимное расположение частей какого-либо предмета, машины, прибора, определяющее его назначением и предусматривающее способ соединения, взаимодействия частей, а также материал, из которого отдельные части (элементы) должны быть изготовлены [ГОСТ Р 57945–2017, статья 2.66].

конструктором посредством принятия и исполнения конкретных решений (проектных, конструкторских, конструкторско-технологических, технологических)¹. Такие решения основаны на физическом понимании мира и использовании конструкторско-технологических способов их реализации в технических объектах. В этом случае следует обосновывать каждое решение конструктора, которое потенциально способно привести к отказу, при этом любой довод должен находиться в логике рассуждений конструктора – понятной и доступной ему для обеспечения функционирования изделия без отказов.

Для подтверждения таких решений разумно использовать приемы параметрического моделирования изделий на основе имеющихся схем (конструктивно-компоновочных, конструктивно-силовых и проч.), эскизов, чертежей, 3D-моделей. В этом случае любые графические, текст-графические или цифровые модели конструкции должны быть представлены в виде параметрической модели, при изменении параметров которой достигается выполнение изделием всех требуемых функций.

Исходя из принципов физичности (закономерностей причинно-следственных связей)² и физической необходимости (непротиворечия законам природы)³ несложно представить выполнение изделием требуемых функций на основе параметрической модели, описывающей его функциональность, работоспособность и надежность [17, 36, 37, 44]. Логическая последовательность рассуждений здесь такова. Если конструкцию представить как набор выходных параметров, которые характеризуют выполнение требуемых функций (т. е. функциональность), значение каждого параметра конструкции определить исходя из сочетания режимов и условий применения (т. е. работоспособность), а изменение значений параметров конструкции во времени ограничить в допустимом диапазоне (т. е. надежность), то можно получить обобщенную параметрическую модель функционирования изделия, в которой критерии выполнения требуемых функций (выходные параметры и допустимые диапазоны изменения их значений) взаимосвязаны, взаимообусловлены и подчинены целям достижения заданной работоспособности и надежности [44]. С недавних пор такой подход укладывается в логику требований стандартов серии «Системы и комплексы космические», разработанных АО «ЦНИИмаш» в 2019–2020 гг.

¹ Согласно определениям соответствующих терминов, связанных со словом «решение» по ГОСТ Р 57945.

² Физичности принцип: Принцип, согласно которому всякой системе (независимо от ее природы) присущи законы (закономерности), возможно, уникальные, определяющие внутренние причинно-следственные связи ее существования и функционирования.

³ Физическая необходимость: Фактическая обусловленность явления определенным обстоятельством действительности и однозначно предсказуемое в рамках знания о ней (противопоставляемая случайности).

1. С введением государственного стандарта ГОСТ Р 58629 одна из задач анализа видов, последствий и критичности отказов (АВПКО) изделий и процессов космического назначения направлена на определение ключевых конструктивных (функциональных и физических) характеристик критичных элементов и их контролепригодности. Правда в стандарте не установлен метод решения задачи по выявлению таких ключевых характеристик (хотя, исходя из общей концепции проведения FMEA-анализа, можно предположить, что они определяются, например, методом экспертных оценок). Кроме того, не совсем понятно, как поступать в случае, если выполнение требуемых функций невозможно выразить физическими величинами, но можно характеризовать качественными признаками изделия, которые описываются вероятностями (как степенью уверенности в том, что при установленных условиях, некоторое событие произойдет). Тем не менее, в целом требования стандарта ГОСТ Р 58629 по выявлению ключевых характеристик критичных элементов соответствуют концепции установления функциональности в обобщенной параметрической модели функционирования изделия [44].

2. Анализ худшего случая по ГОСТ Р 58626 предоставляет возможность определения и перечень формализованных процедур анализа, включающих в себя количественную оценку допусков изменения значений выходных параметров объекта анализа в зависимости от возможных значений его внутренних и входных параметров. Данная процедура есть не что иное, как определение работоспособности изделия при худших сочетаниях режимов и условий применения в обобщенной параметрической модели функционирования изделия [44]. Однако согласно ГОСТ Р 58626, такой анализ проводится на основании результатов АВПКО (АВПО), выполненного в соответствии с требованиями ГОСТ Р 58629, т. е. методом экспертных оценок, исходя из мнения экспертов (специалистов) для последующего принятия (или выбора) решений, что не является достаточным условием для установления полного перечня худших случаев. Кроме того, в силу неразвитости терминологии отдельных понятий, например, «режим» и «эмерджентность» [44, 45], подход к анализу худшего случая по ГОСТ Р 58626 сохраняет неопределенности по вычислению максимальных и минимальных значений допустимых отклонений (наихудшего случая) выходных параметров.

3. Согласно разъяснениям, приведенным в справочном приложении к ГОСТ 27.002-89, не принято делать различий между показателем вероятности безотказной работы по условиям прочности на основании статистических данных и вероятностью того, что в пределах заданного отрезка времени изменения значений параметров прочности будут находиться в допустимых пределах с учетом коэффициентов безопасности и запасов прочности [18]. Фактически такой подход к оценке показателя вероятности безотказной работы соответствует

определению надежности с учетом конструктивных запасов так, чтобы с допустимым доверием гарантировать нахождение значений рассматриваемых параметров в допустимой области [17, 44].

Таким образом, основная задача при выявлении возможных причин редких отказов – выполнить на системной основе квалифицированный анализ по определению функциональности, работоспособности и надежности изделия с учетом критичных выходных параметров и вероятностных показателей, влияющих на выполнение требуемых функций с допустимой вероятностью отказов. Решение такой задачи достижимо с использованием обобщенной параметрической модели функционирования [17, 36, 37, 44] и не противоречит действующему нормативному обеспечению.

Пути достижения системности анализа

Анализ по определению функциональности, работоспособности и надежности изделия проводят на основе данных о режимах и условиях применения изделия и текущего состояния конструкторской документации (в состоянии «как она есть») с учетом заложенных в ней требований к изготовлению и проведению технического контроля [5]. Эффективность такого анализа является максимальной, если производить его исходя из служебного назначения – главной задачи, для решения которой создается изделие, включающей (помимо общих целей проектирования) все дополнительные условия, ограничения и требования, которые эту задачу количественно уточняют и конкретизируют [46]. После установления служебного назначения строится дерево частных задач для составных частей изделия, обеспечивающих решение главной задачи. На основе каждой из частных задач формулируют требуемые функции (определяемые вопросом «что делает объект или отдельные его элементы?»), каждая из которых является внешним проявлением свойств изделия строго определенной физической природы в заданных режимах и условиях применения. Полученное таким образом дерево требуемых функций является необходимым и достаточным условием для обоснования заданной работоспособности и надежности изделия на базе инженерных дисциплин и конструкторско-технологических способов обеспечения его надежности.

После построения дерева требуемых функций становится возможным определение потенциальных отказов в виде вербального описания гипотетических событий, препятствующих выполнению соответствующих функций. Далее определяют условия, которые делают отказы невозможными (условия безотказности). Поиск этих условий производится методом отрицательных суждений (антитезисов). Логическая схема проведения такого метода строится на предвзятом суждении, что отказ какого-либо критичного элемента уже «произошел». Если

при конструировании предприняты и документально подтверждены необходимые и достаточные меры, которые позволяют устранить причину возможного отказа, то это служит доказательством того, что означенное отрицательное суждение ложно и, следовательно, условие безотказности обеспечено. Под условием безотказности понимают каждое из свойств конкретного критичного элемента, которое делает соответствующую причину отказа невозможной [47]. Важно, что при таком подходе свойства критичных элементов, от которых зависит безотказность, выявляются автоматически на базе сугубо инженерных подходов (без учета субъективного мнения «экспертов»).

Сам по себе перечень свойств критичных элементов позволяет характеризовать каждый критичный элемент количественно, в зависимости от выбранной модели его функционирования – вероятностно-статистической или физической [17]. Причем, если поведение критичного элемента можно охарактеризовать физическими величинами, то для описания свойств критичного элемента выбирают выходные параметры, в максимальной степени описывающие физическую природу в заданной системе отношений данного элемента в изделии и в целом изделия во внешней среде. Данная процедура в полной мере соответствует требованиям ГОСТ Р 58629. Если же модель не позволяет характеризовать функционирование критичного элемента с помощью физических величин (не хватает знаний о физической природе отказов), то для описания свойства критичного элемента выбирают показатель в виде вероятности отказов при выполнении требуемой функции на основе «черного ящика» или логико-вероятностных моделей. При необходимости параметры и вероятностные показатели функционирования объекта могут быть приведены к согласованному безразмерному виду (когда параметры можно представить в виде вероятности изменения своих значений в допустимых пределах, по аналогии с пояснениями в справочном приложении к ГОСТ 27.002–89 [18]). Это дает возможность производить оценку прогнозной (плановой) надежности изделия методом расчета надежности по вероятностям выполнения компонентами и элементами требуемых функций [17].

Анализ надежности высокоответственных невосстанавливаемых изделий с малой наработкой

На основе изложенного подхода разработана методика конструкторско-технологического анализа надежности (КТАН) [5, 15–17, 36, 37, 44], применение которой не отменяет ни одну из инженерных практик, но развивает и дополняет их, давая возможность:

- уйти от концепции случайности причин отказов и установить их логико-математической связь с конструктивно-технологическими факторами;

- установить связь выходных параметров функционирования с вероятностью отказов;
- определить конструкторские и технологические риски возникновения отказов, которые традиционными методами аналитической и экспериментальной верификации выявить невозможно;
- своевременно обнаружить редкие причины возможных отказов;
- сократить число потенциальных отказов конструкционного характера на ранних стадиях жизненного цикла и т. п.

Несмотря на то, что методика конструкторско-технологического анализа надежности (КТАН) подразумевает оценку (расчет) надежности, в первую очередь ее следует рассматривать как комплекс конструкторско-технологических и организационных мероприятий по исключению (снижению вероятности) отказов, основанный на анализе технической документации, который включает:

- постановку задач для проведения расчетов (выполнение необходимых и достаточных расчетов параметров работоспособности и надежности по заданным критериям для максимального снижения вероятности необоснованных рисков возникновения возможных отказов);
- постановку задач для экспериментальной отработки, включающую опытное определение значений параметров, которые не могут быть получены в результате расчетов из-за отсутствия необходимых данных, и подтверждение требуемых параметров работоспособности при наземной экспериментальной отработке, когда количество поставляемых на испытания объектов ограничено по финансово-экономическим соображениям;
- установку необходимых и достаточных требований в конструкторской документации для изготовления и эксплуатации изделий;
- получение контрольного списка (чек-листа) выходных параметров конструкции, по которым проводят проверки качества и надежности изделий;
- планирование мероприятий по предупреждению отказов конструкционного характера на всех стадиях жизненного цикла;
- итерационный подсчет (калькулирование) прогнозируемой надежности в результате проведения требуемых мероприятий по предупреждению отказов конструкционного характера;
- оценку конструкторско-технологических решений на соответствие заданным требованиям к надежности.

Использование конструкторско-технологического анализа надежности (КТАН) создает условия, при которых обеспечение надежности становится естественной и неотъемлемой частью работы конструкторов, позволяющей принимать инженерные решения сообразно заданным требованиям надежности (а не в отрыве от них, как это происходит при использовании статистических подходов к надежности). При этом, в отличие от анализа видов, последствий и критичности отказов (FMECA),

предназначенного для выявления и оценки критичности дефектов и несоответствий изделий (по результатам выполнения производственных процессов или процедур), КТАН служит для верификации решений конструктора с учетом технологических ограничений (направленных на предотвращение причин возникновения возможных отказов на физическом уровне, до того, как изделие будет изготовлено).

Методика КТАН опробована при конструировании механических устройств одноразового срабатывания космического назначения и узлов гидроавтоматики технологического оборудования нефтяных скважин [5, 15]. Причем такой анализ всегда проводился после завершения экспериментальной отработки (и даже летной квалификации), принятой в организации-разработчике механизмов согласно установленной нормативной документации. Тем не менее, анализы позволили на практике выявить конструкторские и технологические ошибки в технической документации; дать оценку эффективности существующей расчетно-экспериментальной отработки конструкции изделий; оценить достаточность установленных требований в конструкторской документации; выявить недопустимые сочетания параметров конструкций исходя из конструктивных ограничений, реальных условий изготовления и контроля; сделать выводы об отказоспособности изделий; произвести прогнозную оценку выполнения заданных требований к надежности; выдать рекомендации по изменению конструкции для обеспечения заданной надежности изделий. Фактически проведение КТАН позволяет выявить и устранить недостатки традиционных методов проектирования, конструирования и экспериментальной отработки для достижения заданной надежности [5, 15].

Заключение

Для высокоответственных невосстанавливаемых изделий космического назначения с малой наработкой (в первую очередь, механических устройств КА одноразового срабатывания) требования безотказности разумно рассматривать главным образом с позиций финансово-экономических, безопасностных и имиджевых рисков утраты КА. С точки зрения инженера-конструктора число девяток после запятой (с учетом округления до меньшего числа девяток для повышения достоверности) следует воспринимать как индикатор для применения подходов к обеспечению требуемой безотказности при разработке изделия.

При двух заданных девятках после запятой вполне приемлемо использовать методики аналитической и экспериментальной верификации, принятые в ракетно-космической отрасли, – выполнение расчетов надежности статистическими методами современной теории надежности и параметров работоспособности (из рекомендуемого перечня номенклатуры расчетов по ОСТ 92-0290), использование методологии FMEA-анализа и концепции

Stage-Gate, проведение наземной экспериментальной отработки на единичных отработочных макетах для каждого вида воздействий [5–8, 27–31, 35, 38–43].

При увеличении числа требуемых девяток целесообразно дополнительно применять методики раннего предупреждения отказов, одной из которых является КТАН, дающий возможность конструктору принимать обоснованные технические решения на основе инженерных дисциплин и конструкторско-технологических способов обеспечения качества и надежности [5, 15–17, 36, 37, 44].

Выбор одной из двух указанных стратегий обеспечения надежности определяется исключительно осознанием и пониманием разработчиком потенциальных опасностей, что дает возможность управлять рисками возникновения возможных редких отказов либо обоснованно отказаться от такой возможности.

Библиографический список

1. Spacecraft Systems Engineering // P. Fortescue, J. Stark, G. Swinerd. NJ.: John Wiley & Sons, 2003. 704 p.
2. Always P. Rockets of the Wold. Published by Saturn Press, 1999. 384 p.
3. Севастьянов Н.Н. Управление надежностью космических аппаратов с длительными сроками эксплуатации // Космонавтика и ракетостроение. 2017. № 3. С 133–148.
4. Горбенко А.В., Засуха С.А., Рубан В.И. и др. Безопасность ракетно-космической техники и надежность компьютерных систем: 2000–2009 гг. // Авиационно-космическая техника и технология. 2011. № 1. С. 9–20.
5. Похабов Ю.П. Теория и практика обеспечения надежности механических устройств одноразового срабатывания. Красноярск: СФУ, 2018. 338 с.
6. Патраев В.Е. Методы обеспечения и оценки надежности космических аппаратов с длительным сроком активного существования. Красноярск: СибГАУ, 2010. 136 с.
7. Патраев В.Е., Халиманович В.И. Надежность космических аппаратов космического обеспечения. Красноярск: СибГАУ, 2016. 208 с.
8. Патраев В.Е., Шангина Е.А. Надежность технических систем космических аппаратов. Красноярск: СФУ, 2019. 66 с.
9. Космические аппараты [Электронный ресурс] // АО «ИСС» имени академика М.Ф. Решетнева: сайт. URL: iss-reshetnev.ru (15.03.2021).
10. Запуски: база данных [Электронный ресурс] // Ракеты-носители, спутники, самолеты, приборы: сайт. URL: http://ecoruspace.me/ (15.03.2021).
11. Saleh J.H. & Caster J.-F. Reliability and Multi-State Failures: A Statistical Approach, First Edition. NJ.: John Wiley & Sons, 2011. 206 p.
12. ATR-2009(9369)-1. Critical Clearances in Space Vehicles / Brian W. Gore. The Aerospace Corporation. 2008. 31 October. 41 p.
13. Hecht H. & Hecht M. Reliability prediction for spacecraft, Report prepared for Rome Air Development Center, no. RADCR-TR-85-229, Dec. 1985. 156 p.
14. Туманов А.В., Зеленцов В.В., Щеглов Г.А. Основы компоновки бортового оборудования космических аппаратов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 344 с.
15. Модель и методика оценки влияния плановых мероприятий по предупреждению отказов конструкционного характера на надежность космических аппаратов в части отказов их механических устройств одноразового срабатывания. Инв. № 532-ОТ-МКБ-0031-19. № ГР 1920730200892217000241851. Железногорск: АО «НПО ПМ МКБ», 2019. 220 с.
16. Похабов Ю.П. Проблемы надежности и пути их решения при создании уникальных высокоответственных систем // Надежность. 2019. Т. 19. № 1. С. 10–17.
17. Похабов Ю.П. Надежность: взгляд конструктора // Надежность. 2020. Т. 20. № 4. С. 13–20.
18. Приложение (справочное) // ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1990. 37 с.
19. Рябинин И.А. Академик А.И. Берг и проблемы надежности, живучести и безопасности // Академик Аксель Иванович Берг (К столетию со дня рождения). М. Гос. политехн. музей, 1993. С. 6–25.
20. Рябинин И.А. Основы теории и расчета надежности судовых электроэнергетических систем. Л.: Судостроение, 1971. 456 с.
21. Болотин В.В. Применение методов теории вероятности и теории надежности в расчетах сооружений. М.: Стройиздат, 1971. 255 с.
22. Волков Л.И., Шишкевич А.М. Надежность летательных аппаратов. М.: Высш. школа, 1975. 296 с.
23. Тимашев С.А., Похабов Ю.П. Новые методы анализа и оценки надежности изделий ракетно-космической техники // Безопасность и мониторинг техногенных и природных систем: материалы и доклады / VI Всероссийская конференция (18–21 сентября 2018, Красноярск). Красноярск: СФУ, 2018. С. 254–259.
24. «Роскосмос» снизит цены на пуск ракет на 30% из-за демпинга SpaceX Маска [Электронный ресурс] // РосБизнесКонсалтинг: сайт. URL: https://www.rbc.ru/technology_and_media/10/04/2020/5e90869c9a7947d4640156b7 (15.03.2021).
25. Крылов А.М. Сравнительный анализ космической деятельности России, Китая и Индии [Электронный ресурс] // МКК: сайт. [2010]. URL: http://mosspaceclub.ru/base/base.php (15.03.2021).
26. Белозерцев А.И., Эль-Салим С.З. Детерминированная модель повышения надежности аналитических систем // Надежность и качество: труды международного симпозиума. 2017. Т. 2. С. 396–399.
27. Кузнецов А.А. Надежность конструкции баллистических ракет. М.: Машиностроение, 1978. 256 с.
28. Кузнецов А.А., Золотов А.А., Комягин В.А. и др. Надежность механических частей конструкции летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1979. 144 с.

29. Шатров А.К., Назарова Л.П., Машуков А.В. Механические устройства космических аппаратов. Конструктивные решения и динамические характеристики. Красноярск: СибГАУ, 2006. 84 с.

30. Шатров А.К., Назарова Л.П., Машуков А.В. Основы конструирования механических устройств космических аппаратов. Конструктивные решения, динамические характеристики. Красноярск: СибГАУ, 2009. 144 с.

31. Романов А.В., Тестоедов Н.А. Основы проектирования информационно-управляющих и механических систем космических аппаратов. СПб.: Профессионал, 2015. 240 с.

32. Postma R.W. Force and torque margins for complex mechanical systems / Proceedings of the 37th Aerospace Mechanisms Symposium, Johnson Space Flight Center, May 19–21, 2004. P. 107–118.

33. Space Vehicle Mechanisms – Elements of Successful Design, Edited by Peter L. Conley. NJ.: John Wiley & Sons, 1998. 794 p.

34. Dhillon B.S., Singh C. Engineering reliability. NJ.: John Wiley & Sons, 1981. 339 p.

35. Колобов А.Ю., Дикун Е.В. Интервальные оценки безотказности единичных космических аппаратов // Надежность. 2017. № 4. С. 23–26.

36. Похабов Ю.П. Надежность в цифровых технологиях // Надежность. 2020. Т. 20. № 2. С. 3–11.

37. Похабов Ю.П. Проектирование сложных изделий с малой вероятностью отказов в условиях Индустрии 4.0 // Онтология проектирования. 2019. Т. 9. № 1 С. 24–35.

38. Космические вехи: сб. науч. тр., посвященный 50-летию создания ОАО «ИСС» им. академика М.Ф. Решетнева». Красноярск: ИП Суховольская Ю.П., 2009. 704 с.

39. Design for reliability / Edited by Dana Crowe et al. NJ.: CRC Press LLC, 2001. 220 p.

40. Доронин С.В., Похабов Ю.П. Подходы к выбору расчетных случаев нагружения силовых конструкций технических объектов // Безопасность и мониторинг природных и техногенных систем: материалы и доклады / VII Всероссийская конференция (5–9 октября 2020, Кемерово); научн. ред. В.В. Москвичев. Новосибирск: ФИЦ ИВТ, 2020. С. 43–46.

41. Писцова Ю.П., Николаева Н.Г., Приймак Е.В. и др. Анализ видов и последствий несоответствий

(FMEA) конструкторской документации // Вестник Казанского технологического университета. 2004. № 1. С. 411–415.

42. Исаев С.В. Такой FMEA нам не нужен! (проблемы при внедрении и «детские» ошибки) // Методы менеджмента качества. 2008. № 3. С. 30–32.

43. Анализ видов и последствий потенциальных отказов (дефектов) FMEA [Электронный ресурс] / авт.-сост. М.С. Стенгач, А.А. Горбунов, В.Н. Кобзев. Самара, 2011. 1 эл. опт. диск (CD-ROM).

44. Похабов Ю.П. Проектирование высокоответственных систем с учетом надежности на примере поворотной штанги // Журнал СФУ. Техника и технологии. 2019. Т. 12. № 7. С. 861–883.

45. Тарасенко Ф.П. Прикладной системный анализ. М.: КНОРУС, 2017. 322 с.

46. Проектирование технологий автоматизированного машиностроительного производства / И.М. Баранчукова, А.С. Гусев, Ю.Б. Крамаренко и др. М.: Высш. шк., 1999. 416 с.

47. Герсевич Н.М. Применение математической логики к расчету сооружений / Н.М. Герсевич. Собр. соч. М.: Стройвоенмориздат, 1948. Т. 1. С. 123–203.

Сведения об авторе

Юрий Павлович Похабов – кандидат технических наук, Открытое акционерное общество «НПО ПМ – Малое Конструкторское Бюро» (ОАО «НПО ПМ МКБ»), начальник центра научно-технических разработок, Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация, e-mail: pokhabov_yury@mail.ru

Вклад автора в статью

В статье рассмотрены вопросы обеспечения надежности высокоответственных невосстанавливаемых изделий с малой наработкой на основе одной из методик раннего предупреждения отказов конструкционного характера. Статья является развитием идей автора, изложенных в журналах «Надежность» за 2020 г. – № 2 и № 4.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Методика оценки объема ЗИП с неснижаемым уровнем

Валерий А. Чепурко^{1*}, Алексей Н. Черняев²

¹АО РАСУ, Москва, Российская Федерация, ²МЭИ, Москва, Российская Федерация

*VACHepurko@rasu.ru



Валерий А.
Чепурко



Алексей Н.
Черняев

Резюме. Цель. Цель работы состоит в коррекции классической методики [1, 4], приводящей к неправильной оценке необходимого объема ЗИП при интенсивностях замен отказавших частей, сопоставимых с интенсивностями пополнения ЗИП. Для коррекции выбрана модель пополнения ЗИП по заданному уровню. При этом рассматриваются две ситуации в модели: с возможностью коррекции заявки в случае необходимости увеличения объема пополнения и в случае отсутствия такой возможности. Целью работы также является сравнительный анализ классического и скорректированного варианта решения задачи и разработка рекомендаций по практическому применению методики пополнения ЗИП по заданному уровню. **Методы.** Используются Марковские модели [2, 3, 5] для описания системы. Простейшие потоки событий. Уравнение Колмогорова для получения финальных вероятностей. Стационарное решение системы уравнений Колмогорова. Классические методы теории вероятностей и математической теории надежности [6]. **Выводы.** В статье корректируется известная методика оценки необходимого количества ЗИП с неснижаемым уровнем. В статье теоретически обосновывается зависимость интенсивности возвратных переходов от индекса состояния графа. Показано, что в ситуации, когда заявка не корректируется, интенсивности возвратных переходов из состояний, в которых достигнут и превзойден неснижаемый уровень ЗИП, должны постепенно увеличиваться по мере того, как продолжает уменьшаться уровень запаса. При этом множитель будет иметь степенную зависимость от индекса интенсивности перехода. Теоретически и экспериментально доказано, что классическая методика оценки ЗИП приводит к завышенным оценкам. Теоретически выведено ограничение (3), при котором задача решается достаточно просто классическими методами. Показано, что при невыполнении ограничения (3) математически возникает неопределенность в значении интенсивности возвратных переходов. В этом случае корректная постановка задачи приводит к графам с линейно-возрастающим числом состояний, что автоматически относит задачу к разряду трудоемких. В случае невыполнения ограничения, делается упрощающее допущение, при котором получено стационарное решение задачи. Показано, что при этом допущении решение задачи консервативно. В том случае, если заявка корректируется, показано, что интенсивности возвратных переходов из тех же состояний должны постепенно уменьшаться по мере того, как продолжает уменьшаться уровень запаса. При этом множитель будет иметь гиперболическую зависимость от индекса интенсивности перехода. Данная зависимость приводит к консервативному решению задачи пополнения ЗИП с корректировкой заявки. В работе определено отношение, регулирующее степень консерватизма. Теоретически и экспериментально доказано, что классическая методика оценки ЗИП в таком случае приводит к заниженным оценкам. Получено стационарное решение задачи пополнения ЗИП с корректировкой заявки. В обоих случаях учета факта коррекции заявки выработан критерий пополнения ЗИП по заданному уровню. Проведен сравнительный анализ методик.

Ключевые слова: Марковский анализ, граф, состояние графа, вероятность перехода, интенсивность отказов, интенсивность пополнения, ЗИП, неснижаемый уровень запаса, коррекция заявки.

Для цитирования: Чепурко В.А., Черняев А.Н. Методика оценки объема ЗИП с неснижаемым уровнем // Надежность. 2021. №3. С. 13-19. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-3-13-19>

Поступила 31.03.2021 г. / После доработки 22.07.2021 г. / К печати 17.09.2021 г.

Введение

Основными количественными характеристиками запасов в комплексах ЗИП являются показатель достаточности (ПД). Предложенные методики оценивания объема ЗИП обычно предполагают, что ПД задается техническим заданием (ТЗ) на разработку изделия или комплекта ЗИП.

Под оценкой запаса какого-либо одного типа понимается определение необходимого объема ЗИП, при котором достигается необходимое значение ПД. Оценка запасов в комплекте ЗИП состоит из оценок запасов каждого типа в отдельности.

Для пополнения комплектов ЗИП применяются различные стратегии:

- периодическое пополнение (ПП). При ПП назначается период T_n пополнения ЗИП, по истечении которого запасы пополняются до первоначального уровня. Если запасы исчерпаны до момента и произошел еще один отказ, то система переходит в неработоспособное состояние до очередного пополнения;

- периодическое пополнение с экстренными доставками (ПЭД). При ПЭД также назначается период T_n . При этом, после исчерпания ЗИП и следующего отказа организуется досрочная (экстренная) доставка запасных частей (ЗЧ) для замены отказавшего модуля и пополнения запасов до начального уровня;

- непрерывное пополнение (НП). При НП заявка на пополнение запасов формируется и передается на исполнение после каждого отказа и использования каждой ЗЧ. Возможна интерпретация пополнения ЗИП как ремонт отказавшей СЧ, которая после 100% восстановления пополняет состав ЗИП;

- пополнение по заданному уровню (ПУ). При ПУ заявка на пополнение запасов формируется после снижения запасов до некоторого установленного уровня, в том числе нулевого, еще до того, как возникает следующий отказ. Заявка всегда формируется при работоспособном состоянии системы. Этим ПУ отличается от ПЭД. Эта стратегия исследуется и модифицируется в данной работе.

Для оценки требуемого объема ЗИП в основном применяются методы Марковского анализа по ГОСТ Р 51901.15.

Предположения Марковского анализа, связанные с вероятностью перехода, можно сформулировать следующим образом:

- переходы состояний являются статистически независимыми событиями;
- интенсивность отказов λ и интенсивность восстановлений μ постоянны;
- вероятности перехода из одного состояния в другое в малом интервале времени Δt (Δt – мало) задаются величинами $\lambda \Delta t$ и/или $\mu \Delta t$;
- условия и режим работы всех однотипных модулей принимается одинаковым.

Рассмотрим следующую математическую модель, позволяющую рассчитать необходимое количество

ЗИП при условии достижения некоторого критического уровня m неснижаемого запаса [1, 4]. Процесс замен без возможности ремонта отказавших элементов соответствует случайному процессу гибели и размножения, который описывается следующим графом состояний (рис. 1). Граф состояний системы содержит $k + 2$ состояния.

Введем обозначения:

n – количество однотипных элементов в системе;

k – планируемый объем ЗИП;

m – уровень неснижаемого запаса, после достижения которого происходит очередное пополнение ЗИП до планируемого значения k ($1 \leq m \leq k$);

λ – интенсивность отказов одного элемента;

$\mu = 1/T_o$ – интенсивность планового пополнения ЗИП;

T_o – среднее время доставки ЗЧ с момента формирования заявки на пополнение.

На графе числами $0, 1, 2, \dots, k$ обозначены работоспособные состояния, соответствующие израсходованному числу ЗИП. Состояние $k + 1$ обозначает исчерпание ЗИП. Стрелки соответствуют переходам из состояния в состояние. Над стрелками приведены интенсивности соответствующих переходов.

Случай 1. Заявка не корректируется

Вначале предположим, что заявка на доставку не корректируется (см. рис. 1), если до поставки партии ЗЧ возникнут дополнительные отказы. Определим интенсивности переходов в том случае, когда заявка на пополнение ЗЧ отправлена и произошли дополнительные отказы.

Очевидно, что $\gamma_0 = 1$. Переход из состояния $k - m + 1$ в состояние 1 произойдет в среднем за меньшее чем T_o время, поскольку заявка на пополнение ЗЧ была подана ранее в состоянии $k - m$. Доля среднего времени перехода из состояния $k - m + 1$ в состояние 1 относительно общего среднего времени последовательного перехода из состояния $k - m$ в состояние $k - m + 1$, а затем в состояние 1 равна $\frac{1/\mu}{1/\mu + 1/n\lambda}$. Таким образом, время перехода из состояния

$k - m + 1$ в состояние 1 будет в среднем равно $\frac{(1/\mu)^2}{1/\mu + 1/n\lambda}$ и

интенсивность соответственно равна $(1 + \rho)\mu$, где $\rho = \frac{\mu}{n\lambda}$.

Т.е. множитель $\gamma_1 = 1 + \rho$ (см. рис. 1).

Обобщим. Рассмотрим переход из состояния $k - m + j$ в состояние j . Переход возможен в том случае, если случайное время η выполнения заявки на пополнение ЗИП оказалось больше $\xi_1 + \dots + \xi_j = \sigma_j$ суммарной нагрузки. Среднее время перехода (в смысле математического ожидания) будет определяться следующим интегралом

$$E[(\eta - \sigma_j)I\{\eta > \sigma_j\}] = \int_0^{\infty} f_{\sigma_j}(x) \int_x^{\infty} (y - x) f_{\eta}(y) dy dx, \quad (1)$$

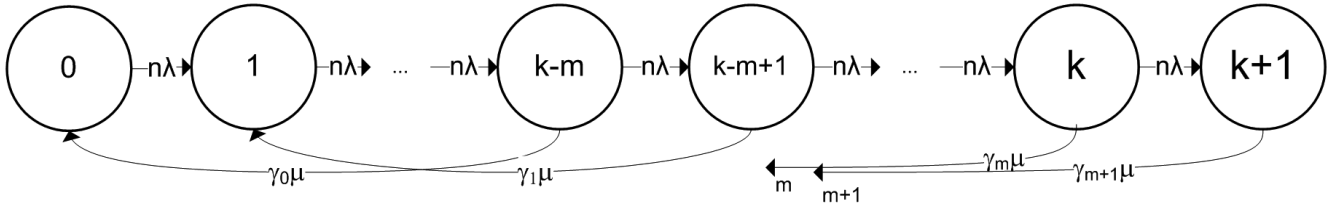


Рис. 1. Граф переходов процесса гибели и размножения

где $E[\]$ – оператор математического ожидания,
 $I\{A\} = \begin{cases} 1, & \text{если } A - \text{истина} \\ 0, & \text{если } A - \text{ложь} \end{cases}$ – индикаторная функция,
 $f_{\sigma_j}(x)$ – плотность распределения суммарной наработки,
 $f_{\eta}(y)$ – плотность распределения времени выполнения заявки. Т.к. $\xi_1, \dots, \xi_j$ – независимые, одинаково распределенные случайные величины, подчиняющиеся экспоненциальному распределению с интенсивностью $n\lambda$, то суммарная наработка будет иметь гамма-распределение с интенсивностью $n\lambda$ и параметром формы j . Подставив в (1) в качестве $f_{\eta}(y)$ плотность распределения экспоненциального распределения с интенсивностью μ после несложных преобразований получим следующий результат

$$E\left[(\eta - \sigma_j)I\{\eta > \sigma_j\}\right] = \frac{1}{\mu} \left(\frac{n\lambda}{n\lambda + \mu} \right)^j.$$

Следовательно, коэффициенты γ_j (см. рис. 1) будут равны

$$\gamma_j = (1 + \rho)^j, \text{ где } \rho = \frac{\mu}{n\lambda}. \quad (2)$$

Интенсивность перехода из состояния $k-m+j$ в состояние j будет равна $\gamma_j\mu$.

Процесс гибели и размножения может быть описан системой уравнений Колмогорова. При этом возможны различные ситуации с количеством входящих и выходящих переходов.

Вначале введем дополнительное условие:

$$k \geq 2m + 1. \quad (3)$$

Это ограничение возникает во избежание возникновения неопределенности у интенсивности переходов (см. рис. 2). Исходные данные: $k=5, m=3$ Интенсивность перехода из состояния 3 в состояние 1 с одной стороны должна быть $\gamma_1\mu$, если в это состояние 3 система перешла из состояния 2. С другой стороны, если в состояние 3 система перешла из состояния 5 и ЗИП в результате пополнен, то интенсивность должна быть равна $\gamma_0\mu$. Такая же неопределенность с интенсивностью перехода из состояния 4 в состояние 2: либо $\gamma_2\mu$, либо $\gamma_0\mu$. Огра-

ничение (3) возникает из решения неравенства $k-m \geq m+1$ – условия, при котором не возникает неопределенность (см. рис. 2).

Всего же может возникнуть пять случаев.

1. $k \geq 2m+3$,

$$\begin{cases} P'_0(t) = -n\lambda P_0(t) + \gamma_0\mu P_{k-m}(t); \\ P'_i(t) = n\lambda P_{i-1}(t) - n\lambda P_i(t) + \gamma_i\mu P_{k-m+i}(t), 1 \leq i \leq m+1; \\ P'_i(t) = n\lambda P_{i-1}(t) - n\lambda P_i(t), m+2 \leq i \leq k-m-1; \\ P'_i(t) = n\lambda P_{i-1}(t) - (n\lambda + \gamma_{i-k+m}\mu)P_i(t), k-m \leq i \leq k; \\ P'_{k+1}(t) = n\lambda P_k(t) - \gamma_{m+1}\mu P_{k+1}(t). \end{cases}$$

2. $k=2m+2$,

$$\begin{cases} P'_0(t) = -n\lambda P_0(t) + \gamma_0\mu P_{k-m}(t); \\ P'_i(t) = n\lambda P_{i-1}(t) - n\lambda P_i(t) + \gamma_i\mu P_{k-m+i}(t), 1 \leq i \leq m+1; \\ P'_i(t) = n\lambda P_{i-1}(t) - (n\lambda + \gamma_{i-k+m}\mu)P_i(t), m+2 \leq i \leq k; \\ P'_{k+1}(t) = n\lambda P_k(t) - \gamma_{m+1}\mu P_{k+1}(t). \end{cases}$$

3. $k=2m+1$,

$$\begin{cases} P'_0(t) = -n\lambda P_0(t) + \gamma_0\mu P_{k-m}(t); \\ P'_i(t) = n\lambda P_{i-1}(t) - n\lambda P_i(t) + \gamma_i\mu P_{k-m+i}(t), 1 \leq i \leq m; \\ P'_i(t) = n\lambda P_{i-1}(t) - (n\lambda + \gamma_0\mu)P_i(t) + \gamma_i\mu P_{k-m+i}(t), i = m+1; \\ P'_i(t) = n\lambda P_{i-1}(t) - (n\lambda + \gamma_{i-k+m}\mu)P_i(t), m+2 \leq i \leq k; \\ P'_{k+1}(t) = n\lambda P_k(t) - \gamma_{m+1}\mu P_{k+1}(t). \end{cases}$$

4. $m+2 \leq k \leq 2m$,

$$\begin{cases} P'_0(t) = -n\lambda P_0(t) + \gamma_0\mu P_{k-m}(t); \\ P'_i(t) = n\lambda P_{i-1}(t) - n\lambda P_i(t) + \gamma_0\mu P_{k-m+i}(t), 1 \leq i \leq k-m-1; \\ P'_i(t) = n\lambda P_{i-1}(t) - (n\lambda + \gamma_0\mu)P_i(t) + \\ + \gamma_{(k-2m-1+i)\vee 0}\mu P_{k-m+i}(t), k-m \leq i \leq m+1; \\ P'_i(t) = n\lambda P_{i-1}(t) - (n\lambda + \gamma_{i-m-1}\mu)P_i(t), m+2 \leq i \leq k; \\ P'_{k+1}(t) = n\lambda P_k(t) - \gamma_{k-m}\mu P_{k+1}(t). \end{cases}$$

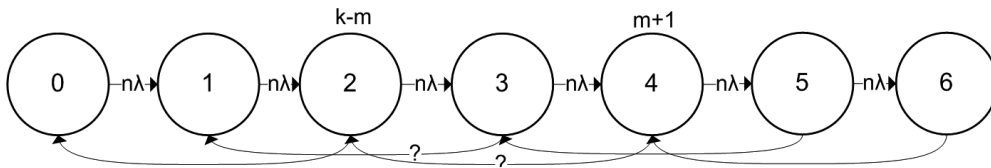


Рис. 2. Граф переходов с неопределенностью интенсивности перехода

5. $k=m+1$,

$$\begin{cases} P'_0(t) = -n\lambda P_0(t) + \gamma_0 \mu P_{k-m}(t); \\ P'_i(t) = n\lambda P_{i-1}(t) - (n\lambda + \gamma_0 \mu) P_i(t) + \gamma_0 \mu P_{k-m+i}(t), 1 \leq i \leq m; \\ P'_i(t) = n\lambda P_{i-1}(t) - (n\lambda + \gamma_0 \mu) P_i(t) + \gamma_1 \mu P_{k-m+i}(t), i = m+1; \\ P'_{k+1}(t) = n\lambda P_k(t) - \gamma_1 \mu P_{k+1}(t). \end{cases}$$

Будем искать стационарное решение. Для этого положим производные в левых частях уравнений равными

0 и применим условие нормировки: $\sum_{i=0}^{k+1} P_i = 1$.

1. $k \geq 2m+3$,

$$\begin{cases} P_0 = \rho P_{k-m}; \\ P_{i-1} = P_i - \gamma_i \rho P_{k-m+i}, 1 \leq i \leq m+1; \\ P_{i-1} = P_i, m+2 \leq i \leq k-m-1; \\ P_{i-1} = (1 + \gamma_{i-k+m} \rho) P_i, k-m \leq i \leq k; \\ P_k = \gamma_{m+1} \rho P_{k+1}. \end{cases}$$

2. $k=2m+2$,

$$\begin{cases} P_0 = \rho P_{k-m}; \\ P_{i-1} = P_i - \gamma_i \rho P_{k-m+i}, 1 \leq i \leq m+1; \\ P_{i-1} = (1 + \gamma_{i-k+m} \rho) P_i, m+2 \leq i \leq k; \\ P_k = \gamma_{m+1} \rho P_{k+1}. \end{cases}$$

3. $k=2m+1$,

$$\begin{cases} P_0 = \rho P_{k-m}; \\ P_{i-1} = P_i - \gamma_i \rho P_{k-m+i}, 1 \leq i \leq m; \\ P_{i-1} = (1 + \rho) P_i - \gamma_i \rho P_{k-m+i}, i = m+1; \\ P_{i-1} = (1 + \gamma_{i-k+m} \rho) P_i, m+2 \leq i \leq k; \\ P_k = \gamma_{m+1} \rho P_{k+1}. \end{cases}$$

4. $m+2 \leq k \leq 2m$,

$$\begin{cases} P_0 = \rho P_{k-m}; \\ P_{i-1} = P_i - \rho P_{k-m+i}, 1 \leq i \leq k-m-1; \\ P_{i-1} = (1 + \rho) P_i - \gamma_{(k-2m-1+i) \vee 0} \rho P_{k-m+i}, k-m \leq i \leq m+1; \\ P_{i-1} = (1 + \gamma_{i-m-1} \rho) P_i, m+2 \leq i \leq k; \\ P_k = \gamma_{k-m} \rho P_{k+1}. \end{cases}$$

5. $k=m+1$,

$$\begin{cases} P_0 = \rho P_1; \\ P_{i-1} = (1 + \rho) P_i - \rho P_{i+1}, 1 \leq i \leq m; \\ P_m = (1 + \rho) P_{m+1} - \gamma_1 \rho P_{m+2}; \\ P_{m+1} = \gamma_1 \rho P_{m+2}. \end{cases}$$

Далее для первого случая приведем полученные рекурсии и окончательное решение. Обозначим для удобства $\rho = \frac{\theta}{n} = \frac{\mu}{n\lambda}$.

$k \geq 2m+3$. Решение находим «сверху вниз».

$$P_k = \gamma_{m+1} \rho P_{k+1};$$

$$P_{i-1} = \gamma_{m+1} \rho P_{k+1} \prod_{j=m-k+i}^m (1 + \gamma_j \rho), k-m \leq i \leq k;$$

$$P_{i-1} = P_i, m+2 \leq i \leq k-m-1.$$

Следовательно

$$P_{m+1} = P_{m+2} = \dots = P_{k-m-1} = \gamma_{m+1} \rho P_{k+1} \prod_{j=0}^m (1 + \gamma_j \rho) = A_m P_{k+1},$$

где $A_m = \gamma_{m+1} \rho \prod_{j=0}^m (1 + \gamma_j \rho)$.

Общая формула

$$P_i = \left(A_m - \gamma_{m+1} \rho \prod_{j=i+1}^m (1 + \gamma_j \rho) \right) P_{k+1}, 0 \leq i \leq m-1.$$

При этом

$$P_m = (A_m - \gamma_{m+1} \rho) P_{k+1}.$$

Применив условие нормировки, получим следующий результат

$$(k-m)A_m + 1 = \frac{1}{P_{k+1}}.$$

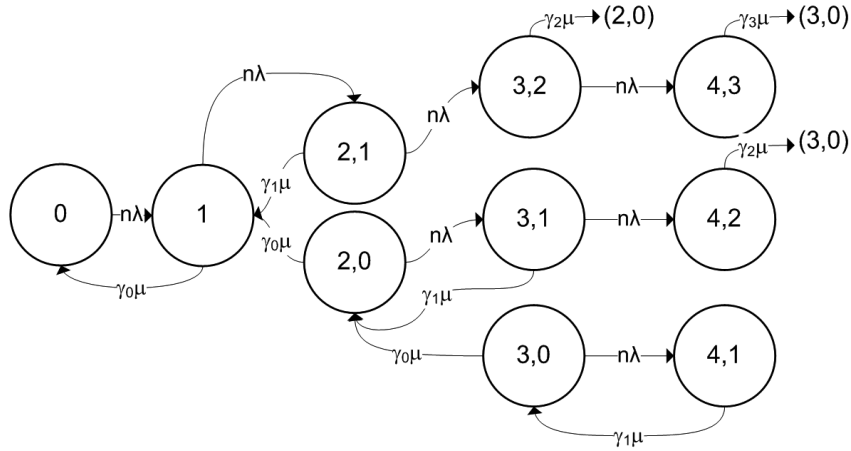
Вторая и третья ситуации приводят к аналогичному выводу.

Таким образом, при ограничении (3) вероятность отказа ЗИП будет определяться выражением

$$P_{k+1} = \frac{1}{1 + (k-m)A_m}, \text{ где } A_m = \gamma_{m+1} \rho \prod_{j=0}^m (1 + \gamma_j \rho). \quad (4)$$

Теперь откажемся от условия (3), т.е. рассмотрим 4 и 5 случаи и реализуем точную модель обслуживания ЗЧ с помощью Марковского графа (рис. 3). Граф в силу возрастающей с ростом k громоздкости изображен для частного случая $k=3, m=2$.

Вначале рассмотрим 4-й случай. Во избежание возникновения неопределенности интенсивности возвратных переходов, в пополнения ЗИП введены дополнительные состояния: (2,0), (2,1), (3,0), (3,1), (3,2), Первое число означает количество ЗЧ взятых из состава ЗИП, а второе – количество отказов, произошедших с момента отправления заявки на пополнение. К примеру (2,0) означает, что произошло два отказа (соответственно 2 замены) и нет неудовлетворенных заявок, пора посылать новый запрос на пополнение $k-m=1$ ЗЧ. (3,1) означает, что произошло три отказа (соответственно 3 замены) есть неудовлетворенная заявка, отосланная в ситуации, когда было израсходовано две ЗЧ из состава ЗИП и пора посылать новый запрос на пополнение $k-m=1$ ЗЧ. (3,2) означает, что произошло три отказа


 Рис. 3. Граф переходов системы в случае $k \leq 2m$.

(соответственно 3 замены) есть неудовлетворенная заявка, отосланная в ситуации, когда была израсходована еще одна ЗЧ из состава ЗИП и пора посылать новый запрос на пополнение $k-m=1$ ЗЧ.

Нахождение точного аналитического решения в общем случае – трудоемкая задача.

В силу этого решим ее в упрощенном варианте, предполагая, что в случае возникающей неопределенности множитель принимает минимальное из возможных значений, т.е. γ_0 .

$$\gamma_i = \min(\gamma_0, \gamma_{i,j}) = \gamma_0 = 1. \quad (5)$$

Такое предположение дает консервативную оценку необходимого количества ЗИП, поскольку в упрощенном варианте интенсивность возвратных переходов в «улучшенные» состояния уменьшается, выполнение заявок притормаживается. Как и ранее, будем находить стационарное решение, применяя те же обозначения

$$\begin{cases} P_0 = \rho P_{k-m}; \\ P_{i-1} = P_i - \rho P_{k-m+i}, 1 \leq i \leq k-m-1; \\ P_{i-1} = (1+\rho)P_i - \gamma_{(k-2m-1+i)\vee 0} \rho P_{k-m+i}, k-m \leq i \leq m+1; \\ P_{i-1} = (1+\gamma_{i-m-1}\rho)P_i, m+2 \leq i \leq k; \\ P_k = \gamma_{k-m}\rho P_{k+1}. \end{cases}$$

Решение системы (6) в явном виде достаточно громоздко. Для численного решения предлагается использовать алгоритм, основанный на замене

$$P_i = a_i P_{k+1}, i = 0, 1, \dots, k+1. \quad (7)$$

При этом коэффициенты a_i будут определяться «обратной» рекурсией:

$$\begin{cases} a_{k+1} = 1; \\ a_k = \gamma_{k-m}\rho; \\ a_{i-1} = (1+\gamma_{i-m-1}\rho)a_i, m+2 \leq i \leq k; \\ a_{i-1} = (1+\rho)a_i - \gamma_{(k-2m-1+i)\vee 0} \rho a_{k-m+i}, k-m \leq i \leq m+1; \\ a_{i-1} = a_i - \rho a_{k-m+i}, 1 \leq i \leq k-m-1. \end{cases}$$

В (6) и (8) для сокращения применяется символ $\vee$, означающий $a \vee b = \max(a, b)$. Вероятность нехватки ЗИП будет равна

$$P_{k+1} = \left(\sum_{i=0}^{k+1} a_i \right)^{-1}. \quad (9)$$

Рассмотрим пятый случай: $k=m+1$.

Из первых двух уравнений получаем рекуррентное соотношение:

$$P_{i-1} = \rho P_i, i = 1, \dots, m+1.$$

Применив последнее уравнение, получаем:

$$P_i = \gamma_1 \rho^{m+2-i} P_{m+2}, i = 0, \dots, m+1.$$

Из условия нормировки, если $\rho \neq 1$, получаем:

$$P_{k+1} = \frac{1-\rho}{1-\rho+\gamma_1\rho-\gamma_1\rho^{m+3}} = \frac{1-\rho}{1+\rho^2-(1+\rho)\rho^{m+3}}. \quad (10)$$

В случае если $\rho = 1$, получаем:

$$P_{k+1} = \frac{1}{1+2(m+2)} = \frac{1}{2m+5}. \quad (11)$$

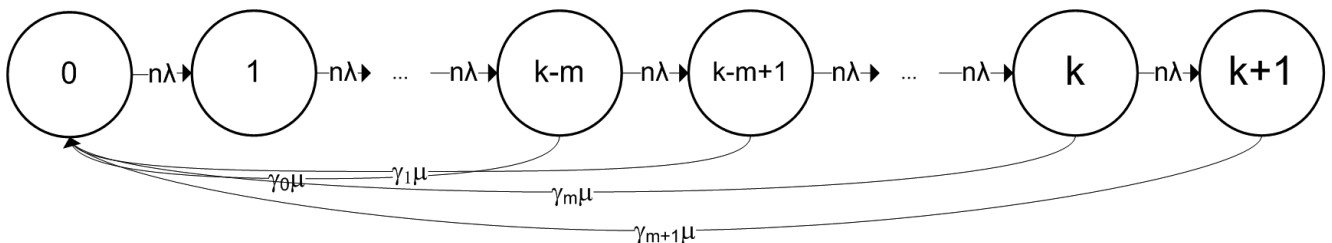


Рис. 4. Граф переходов системы с коррекцией заявки ЗИП

Случай 2. Заявка корректируется

Теперь предположим, что заявка на доставку корректируется в той ситуации, если до поставки партии ЗЧ возникли дополнительные отказы (рис. 4).

В этом случае множители интенсивностей переходов также будут непостоянными, поскольку на пополнение прежней заявки потребуются дополнительные ресурсы времени. Предположим, что на укомплектование единицы ЗИП на складе требуется в среднем времени τ , а на доставку к месту назначения – π . Тогда переход из состояния $k-m$ в состояние 0 займет в среднем времени $m\tau + \pi$. Переход из состояния $k-m+1$ в состояние 1 займет в среднем времени $(m+1)\tau + \pi$. В общем случае переход из состояния $k-m+j$ в состояние j займет в среднем времени $(m+j)\tau + \pi$. При этом $j = 0, 1, \dots, m+1$. Как и ранее, $\gamma_0 = 1$. Тогда

$$\gamma_j = \frac{m\tau + \pi}{(m+j)\tau + \pi}. \quad (12)$$

Если времена τ и π неизвестны, можно воспользоваться оценкой

$$\frac{m\tau + \pi}{(m+j)\tau + \pi} \geq \frac{m}{m+j}.$$

Если положить

$$\gamma_j = \frac{m}{m+j}, \quad (13)$$

то интенсивности возвратных переходов будут получаться заниженными и оценка необходимого количества ЗИП будет завышена, т.е. консервативна. Степень консерватизма будет определяться отношением π/τ . Если $(\pi/\tau) > 1$, время доставки больше времени укомплектования единицы ЗИП, результат будет сильно консервативен, и для получения адекватного результата лучше пользоваться классическим вариантом расчета. Если $(\pi/\tau) < 1$, время доставки меньше времени укомплектования единицы ЗИП, результат будет слабо консервативен, ошибка от применения (13) вместо (12) будет невелика. В любом случае, если известно отношение π/τ , то предпочтительнее пользоваться (12).

Графу на рис. 4 соответствует следующая система дифференциальных уравнений.

$$\begin{cases} P'_0(t) = -n\lambda P_0(t) + \mu \sum_{i=0}^{m+1} \gamma_i P_{k-m+i}(t); \\ P'_i(t) = n\lambda P_{i-1}(t) - n\lambda P_i(t), 1 \leq i \leq k-m-1; \\ P'_i(t) = n\lambda P_{i-1}(t) - (n\lambda + \gamma_{i-k+m}\mu) P_i(t), k-m \leq i \leq k; \\ P'_{k+1}(t) = n\lambda P_k(t) - \gamma_{m+1}\mu P_{k+1}(t). \end{cases} \quad (14)$$

Будем как и прежде искать стационарное решение «сверху вниз»

$$P_k = \gamma_{m+1}\rho P_{k+1};$$

$$P_{i-1} = \gamma_{m+1}\rho P_{k+1} \prod_{j=m-k+i}^m (1 + \gamma_j \rho), k-m \leq i \leq k;$$

$$P_{i-1} = P_i, 1 \leq i \leq k-m-1.$$

Следовательно

$$P_1 = P_2 = \dots = P_{k-m-1} = \gamma_{m+1}\rho P_{k+1} \prod_{j=0}^m (1 + \gamma_j \rho) = A_m P_{k+1}.$$

Вероятность исходного состояния определяется суммой

$$P_0 = \rho \sum_{i=0}^{m+1} \gamma_i P_{k-m+i} = \gamma_{m+1}\rho P_{k+1} \left[1 + \gamma_m \rho + \sum_{i=0}^{m-1} \gamma_i \rho \prod_{j=i+1}^m (1 + \gamma_j \rho) \right].$$

Применив условие нормировки, получим следующий результат

$$\gamma_{m+1}\rho \sum_{i=1}^m \prod_{j=i}^m (1 + \gamma_j \rho) + (k-m)A_m + \gamma_{m+1}\rho + 1 = \frac{1}{P_{k+1}},$$

откуда вероятность нехватки ЗИП будет определяться выражением

$$P_{k+1} = \frac{1}{(k-m)A_m + \gamma_{m+1}\rho + 1 + B_m}, \quad (15)$$

где $A_m = \gamma_{m+1}\rho \prod_{j=0}^m (1 + \gamma_j \rho)$, $B_m = \gamma_{m+1}\rho \sum_{i=1}^m \prod_{j=i}^m (1 + \gamma_j \rho)$.

Как и ранее, подбираем k так, чтобы вероятность (15) была меньше некоторого числа ε . Окончательно получаем следующий критерий оценки необходимого запаса:

$$k \geq \frac{\frac{1-\varepsilon}{\varepsilon} - \gamma_{m+1}\rho - B_m}{A_m} + m, \quad (16)$$

где $A_m = \gamma_{m+1}\rho \prod_{j=0}^m (1 + \gamma_j \rho)$.

Сравнительный анализ получающихся результатов.

Проведем сравнение оценок необходимого объема ЗИП, получающихся классическим способом с постоянными интенсивностями возвратных состояний, и полученных по новой методике, с учетом поправок γ_i , $i = 1, 2, \dots, m+1$.

В табл. 1–6 приведены результаты расчетов необходимого количества ЗИП при различных значениях параметров $\rho = \frac{\mu}{n\lambda}$ и вероятности нехватки ЗИП ε . В качестве неснижаемого уровня взято $m=1$.

Табл. 1. Оценка необходимого объема ЗИП. $\rho=1$. Заявка не корректируется

Способ	ε		
	0,1	0,05	0,01
Классический	4	6	26
Новый	3	3	6

Табл. 2. Оценка необходимого объема ЗИП. $\rho=1$.
Заявка корректируется

Способ	ϵ		
	0,1	0,05	0,01
Классический	3	5	25
Новый	10	20	100

Табл. 3. Оценка необходимого объема ЗИП. $\rho=2$.
Заявка не корректируется

Способ	ϵ		
	0,1	0,05	0,01
Классический	2	3	7
Новый	2	2	3

Табл. 4. Оценка необходимого объема ЗИП. $\rho=2$.
Заявка корректируется

Способ	ϵ		
	0,1	0,05	0,01
Классический	2	2	7
Новый	3	6	26

Табл. 5. Оценка необходимого объема ЗИП. $\rho=5$.
Заявка не корректируется

Способ	ϵ		
	0,1	0,05	0,01
Классический	2	2	2
Новый	2	2	2

Табл. 6. Оценка необходимого объема ЗИП. $\rho=5$.
Заявка корректируется

Способ	ϵ		
	0,1	0,05	0,01
Классический	1	1	2
Новый	2	2	4

Анализируя результаты расчетов, можно отметить, во-первых, что ранее сформулированные выводы о завышении или занижении объема ЗИП оказались верны. Во-вторых, предложенные в статье поправки имеют смысл учитывать при $\rho \leq 5$, т.е. когда интенсивность восстановления ЗИП μ сопоставима по значению с суммарной интенсивностью отказов λ . В этой ситуации действительно можно получить ощутимый экономический эффект в случае, когда заявка не корректируется. В том же случае, когда заявка корректируется, можно получить консервативную, но при этом корректную оценку необходимого объема ЗИП.

С другой стороны, необходимо отметить, что в статье рассмотрено и исследовано решение стационарной задачи, которое, возможно, будет сильно отличаться от решения исходной нестационарной задачи при относительно малых временах расчета. Исследованию численного решения нестационарной задачи будут посвящены дальнейшие разработки авторов в этом направлении.

Заключение

В статье улучшена методика получения оценки необходимого объема ЗИП с неснижаемым уровнем. Проанализированы результаты применения скорректированных и классических оценок. Выявлено, что наиболее ощутимый эффект от применения скорректированной оценки будет при интенсивностях отказов, сопоставимых с интенсивностями пополнения ЗИП.

Библиографический список

1. ГОСТ 27.507-2015 Надежность в технике. Запасные части, инструменты и принадлежности. Оценка и расчет запасов. М.: Стандартинформ, 2017. III, 48 с.
2. ГОСТ Р 51901.15-2005 (МЭК 61165:1995) Менеджмент риска. Применение Марковских методов. М.: Стандартинформ, 2005. IV, 15 с.
3. Черкесов Г.Н. Надежность аппаратно-программных комплексов: Учебное пособие. СПб.: Питер, 2005. 479 с., ил.
4. Черкесов Г.Н. Оценка надежности систем с учетом ЗИП: Учебное пособие для студентов высших учебных заведений. СПб: БХВ-Петербург, 2012. 478 с., ил.
5. Викторова В.С., Степанянц А.С. Модели и методы расчета надежности технических систем. ЛЕНАНД (УРСС), 2016. 256 с.
6. Максимов Ю.Д. Вероятностные разделы математики: Учебник для бакалавров технических направлений. СПб.: Иван Федоров, 2001. 592с., ил.

Сведения об авторах

Валерий Анатольевич Чепурко – кандидат физико-математических наук, доцент, главный специалист отдела расчетных обоснований проектных решений АО РАСУ, Москва, Российская Федерация, e-mail: VAChepurko@rasu.ru

Алексей Николаевич Черняев – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой автоматизированных систем управления тепловыми процессами МЭИ, Москва, Российская Федерация, e-mail: ChernyaevAN@mpei.ru, тел. +7(495)362-77-20, +7(495)362-70-29.

Вклад авторов в статью

Авторами скорректирована и расширена методика оценки ЗИП с неснижаемым уровнем. Проведен сравнительный анализ классической и скорректированной методики.

Чепурко В.А. разработал методику оценки объема ЗИП в ситуации, когда заявка на пополнение ЗИП не корректируется.

Черняев А.Н. разработал методику оценки объема ЗИП в ситуации, когда заявка на пополнение ЗИП корректируется и провел сравнительный анализ.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Оценка параметра потока отказов вагонокомплекта дверей пассажирского поезда

Мария В. Белоусова¹, Виталий В. Булатов^{2*}, Николай В. Смирнов¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет, Российская Федерация, Санкт-Петербург

²Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Российская Федерация, Санкт-Петербург

*bulatov-vitaly@yandex.ru



Мария В.
Белоусова



Виталий В.
Булатов



Николай В.
Смирнов

Резюме. Оценка параметров потоков отказов является необходимой при эксплуатации промышленных изделий. Она осуществляется на базе статистических данных об отказах, возникающих при функционировании в технических объектах в реальных условиях. В технической документации на изделие данный показатель обязательно указывается в разделе «Оценка параметров надежности». В области анализа надежности подвижного состава до сих пор существуют сложности с определением методики оценки данного параметра с учетом уровней системы. Для анализа многокомпонентной системы целесообразно разработать структурную схему надежности и учесть возможные замещающие элементы (резервные элементы). Зачастую многокомпонентные системы представляются различными структурными схемами, где в том числе может быть использована структура « m из n », т.е. система с параллельным соединением элементов, которая работоспособна тогда, когда работают не менее m элементов. Примером такой системы является комплект дверей пассажирского вагона. Производители и заказчики могут по-разному подходить к методу расчета показателей надежности технической системы: сначала определяется требуемое значение показателя безотказности на весь состав, которое задает требования по надежности к вагону. В то же время значение показателя надежности на вагон определяется значениями показателей надежности, входящих в него компонентов (подсистем, узлов и деталей). Между тем далеко не всегда учитывается характер взаимосвязи между компонентами вагона и самим вагоном. При этом производителям вагонов удобно и целесообразно задавать в нормативной документации (а затем и контролировать в эксплуатации) показатели надежности на комплект дверей (компоненты вагона в данной работе) как единой системы. Однако критерии отказа комплекта заданы далеко не всегда. В данной статье рассматривается метод расчета параметра потока отказов для вагонокомплекта дверей, которые входят в состав пассажирского вагона, на основе данных о порядке функционирования дверей и значении параметра потока отказов на одну дверь. **Цель.** Предложить подход к расчету параметра потока отказов вагонокомплекта из 6 дверей на основе анализа возможных структурных схем надежности с последующим переходом к графам переходов и состояний. **Выводы.** Разработаны различные варианты структурных схем расчета надежности комплекта дверей пассажирского вагона в зависимости от критерия отказа системы. Произведен расчет параметра потока отказов вагонокомплекта дверей вагона по разработанным структурным схемам. Сделан вывод о том, что применение метода расчета параметра потока отказов на базе марковских процессов является более приоритетным, чем логико-вероятностный подход, так как учитывает фактор восстановления. Предложена методика расчета параметра потока отказов и времени восстановления дверей вагонокомплекта для структурной схемы надежности «3 из 4» на базе марковских процессов.

Ключевые слова: безотказность, параметр потока отказов, структурная схема надежности, вагонокомплект дверей, марковские процессы.

Для цитирования: Белоусова М.В., Булатов В.В., Смирнов Н.В. Оценка параметра потока отказов вагонокомплекта дверей пассажирского поезда // Надежность. 2021. №3. С. 20-26. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-3-20-26>

Поступила 20.06.2021 г. / После доработки 23.07.2021 г. / К печати 17.09.2021 г.

Введение

На сегодняшний день актуальной задачей является обеспечение высокого уровня надежности железнодорожного транспорта. Безопасность перевозок пассажиров напрямую связана с оценкой показателей безотказности компонентов подвижного состава. Поставщики компонентов для пассажирских вагонов должны осуществлять оценку показателей надежности за согласованный с заказчиком (вагоностроительным заводом) период времени. Производственные площадки, в свою очередь, отчитываются перед транспортными компаниями, оценивая показатели надежности выпускаемой продукции – вагонов. Отсюда возникает разница в подходах к количественной оценке:

1) производители вагонов рассчитывают показатели надежности на вагон, а их поставщики – на отдельные узлы и элементы;

2) методика оценки показателей надежности для вагонов отличается от методики оценки надежности компонентов подвижного состава в силу разных уровней функционирования и конструктива. Это выражается в том, что для оценки средней наработки на отказ вагона будет применим экспоненциальный закон распределения, а для подножек, например, в зависимости от исполнения могут использоваться как экспоненциальный, так и нормальный, а также закон распределения Вейбулла [1]. Экспоненциальное распределение типично для сложных объектов, состоящих из многих элементов с различным распределением наработки [2]. В силу того,

что вагонокомплект состоит из механических (ручных дверей) и автоматических (электромеханических) боковых и торцевых дверей, целесообразно использовать экспоненциальный закон распределения при оценке показателей надежности. Предположение о марковском характере переходов сложной системы обусловливается тем, что если каждый из элементов системы имеет приблизительно экспоненциальный закон распределения безотказной работы, то поведение всей системы может быть описано марковским процессом [3]. В состав автоматических дверей входит программируемый блок управления, который предназначен для реализации функции открытия/закрытия створок, а также для обработки информации, поступающей с индуктивных датчиков положения и датчиков «помеха в створе». Помимо этого, параметр потока отказов дверей принят постоянным в нормальный период эксплуатации в соответствии с результатами применения критерия по ГОСТ Р МЭК 60605-6-2007. Вследствие этого целесообразно полагать, что наработка на отказ двери имеет экспоненциальный закон распределения, и для расчета параметра потока отказов вагонокомплекта дверей было принято решение применить марковский анализ.

Производители пассажирских вагонов учитывают показатели надежности на весь вагонокомплект дверей (4-6 шт., в зависимости от модели) по следующему правилу: значение параметра потока отказов двери умножается на их количество в вагоне, что с точки зрения структурной надежности говорит об элементарной последовательной структуре, где отказ одной двери чаще



а)



б)



в)



г)

Рис. 1. Модели пассажирских вагонов, рассматриваемых относительно структурных схем надежности: а) модель 61-4447 (некупейный); б) модель 61-4462 (купейный); в) модель 61-4460 (вагон-ресторан); г) модель 61-4445 (купейный штабной)

всего приравнивается к отказу вагона, что является спорным заключением.

Для корректного определения характера функционирования дверей в составе вагона с учетом иерархичности связей был рассмотрен структурный подход. Структурная схема надежности (Reliability block diagram, RBD) представляет собой графическое изображение работоспособного состояния системы. Она показывает логическую связь функционирующих компонентов, необходимых для успешной работы системы [4]. Однако методы моделирования на основе структурной схемы надежности предназначены для невозстанавливаемых систем, у которых порядок появления отказов не имеет значения. Для восстанавливаемых объектов и систем, в которых должен учитываться порядок появления отказов, более подходящими являются другие методы, такие как марковский анализ [5-8]. В процессе исследования, для отображения функционирования системы в целом, за основу был положен структурный подход, на основе которого с учетом восстановления системы был осуществлен переход к графу состояний и переходов [4].

Объект исследования

Двери наружные предназначены для оборудования всех типов пассажирских вагонов с конструкционной скоростью движения до 200 км/ч (рис. 1). Двери обеспечивают комфортные и безопасные условия: торцевые – перехода между вагонами, боковые – входа в вагон и выхода из вагона наружу; исключают воздействие резких перепадов давления и температуры; препятствуют попаданию внутрь тамбура вагона пыли и влаги; обеспечивают шумо- и теплоизоляцию тамбура вагона при всех режимах эксплуатации поезда.

На рис. 2 представлена схема расположения разных типов дверей максимальной комплектации вагона.

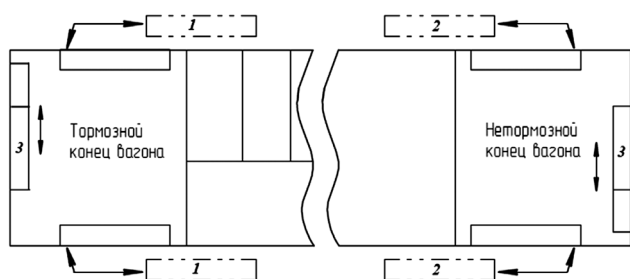


Рис. 2. Схема расположения дверей пассажирского вагона: 1 – дверь боковая одностворчатая с электроприводом; 2 – дверь боковая одностворчатая с ручным приводом; 3 – дверь торцевая одностворчатая с электроприводом.

Структурные схемы надежности вагонокомплекта

Структурную схему надежности вагонокомплекта дверей можно строить в различных вариантах. С точки зрения анализа модели, предполагается, что в рас-

считываемых случаях контроль системы – полный, а переключатели обладают идеальной надежностью. Наиболее простым представлением вагонокомплекта дверей является нерезервированная система (рис. 3), где отказ любого элемента приводит к отказу всей системы. Тогда вероятность безотказной работы системы рассчитывается по известной формуле:

$$P_{cl} = \prod_{i=1}^N P_i \quad (1)$$

где P_i – вероятность безотказной работы элемента; N – количество элементов в системе.



Рис. 3. Линейная структурная схема надежности вагонокомплекта дверей для пассажирского вагона, где E_i – дверь с электроприводом; B_i – торцевая дверь.

Вторым возможным вариантом представления структурной схемы надежности вагонокомплекта дверей является схема с отдельным постоянным резервированием с целой кратностью. Различные способы резервирования, а также выигрыши надежности от них подробно рассматриваются в [9], методы оценки влияния технического обслуживания на эффективность резервирования описаны в [10]. В общем случае вероятность безотказной работы данной схемы рассчитывается по формуле:

$$P_p = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P_i) \quad (2)$$

Для вагонокомплекта рассмотрим комбинированные варианты схем:

- резервирование ручной двери второй ручной (рис. 4а);
- резервирование боковых автоматических дверей ручными (рис. 4б).

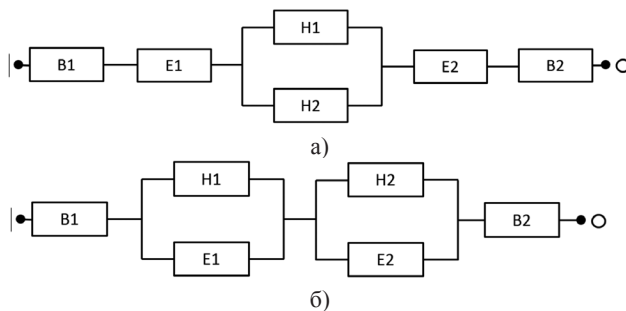


Рис. 4. Резервированные структурные схемы надежности вагонокомплекта дверей для пассажирского вагона, где E_i – боковая дверь с электроприводом; B_i – торцевая дверь, H_i – дверь с ручным приводом.

Таким образом, получаем два варианта смешанной системы с поэлементным резервированием отдельных блоков.

Вероятность безотказной работы с резервированием дверью с ручным приводом (рис. 4а) рассчитывается по формулам (1) и (2):

$$P_{c2} = P_{B1} \cdot P_{E1} \cdot P_{B2} \cdot P_{E2} \cdot [1 - (1 - P_{H1}) \cdot (1 - P_{H2})].$$

Вероятность безотказной работы с резервированием боковых дверей с электромеханическим приводом дверьми с ручными приводами (рис. 4б) рассчитывается так:

$$P_{c3} = P_{B1} \cdot P_{B2} \cdot [1 - (1 - P_{E1}) \cdot (1 - P_{H1})] \cdot [1 - (1 - P_{E2}) \cdot (1 - P_{H2})].$$

Еще одним возможным применимым подходом к структурной оценке является представление вагонокомплекта как структуры « m из n » [4]. Систему такого типа

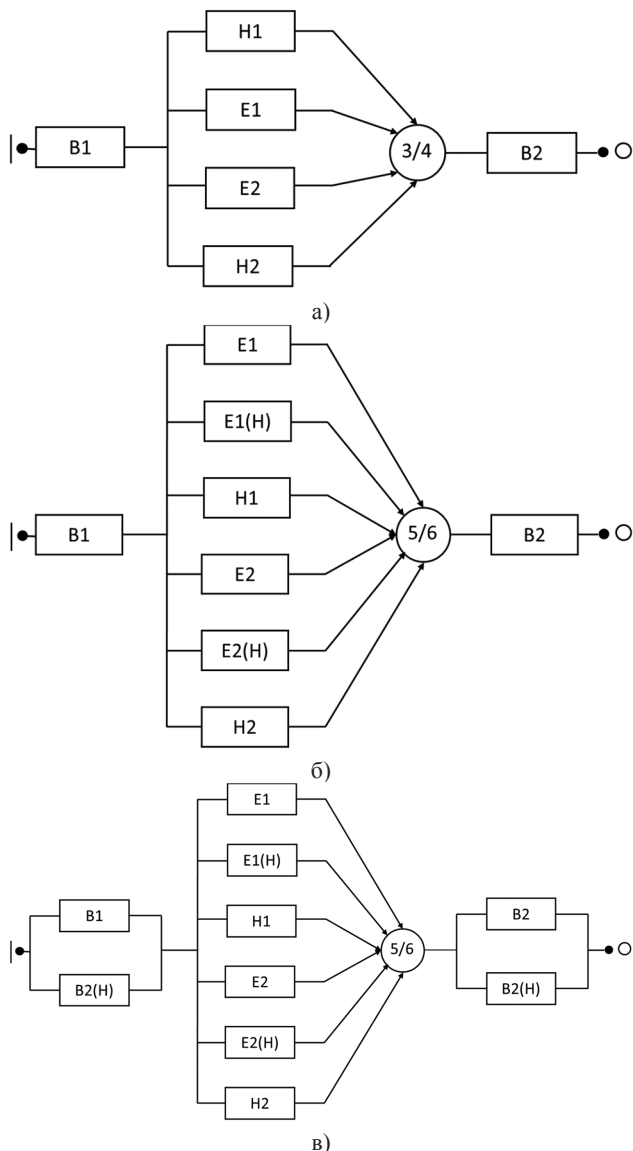


Рис. 5. Структурные схемы « m из n » для оценки надежности вагонокомплекта дверей пассажирского вагона, где Ei – дверь с электромеханическим приводом; Ei(H) – дверь с электромеханическим приводом в ручном режиме эксплуатации; Bi – торцевая дверь; Bi(H) – дверь торцевая с электромеханическим приводом в ручном режиме эксплуатации; Hi – дверь с ручным приводом.

можно рассматривать как вариант системы с параллельным соединением элементов, которая работоспособна, когда работают хотя бы m элементов из n ($m < n$).

Здесь опишем три варианта:

- система «3 из 4», которая считается работоспособной, когда работают двери H1, E1 и E2 (рис. 5а);
- система «5 из 6», в которой учитывается возможная работа дверей с электромеханическим приводом в ручном режиме Ei(H) (рис. 5б).
- система «5 из 6», в которой учитывается возможная работа боковых и торцевых дверей с электромеханическим приводом в ручном режиме Ei(H) и Bi(H) (рис. 5в).

Обе представленные структуры являются смешанными: к « m из n » добавляются последовательно соединенные или поэлементно зарезервированные торцевые двери.

Тогда, при условии равнонадежности всех элементов, входящих в структуру « m из n », вероятность безотказной работы для структуры, представленной на рис. 5а, будет равна:

$$P_{c4} = P_{B1} \cdot P_{B2} \cdot (4 \cdot P_m^3 - 3 \cdot P_m^4),$$

где P_m – элемент структуры « m из n ».

Вероятность безотказной работы для структуры, представленной на рис. 5б, при тех же условиях:

$$P_{c5} = P_{B1} \cdot P_{B2} \cdot (6 \cdot P_m^5 - 5 \cdot P_m^6).$$

Наконец, вероятность безотказной работы для структуры, представленной на рис. 5в, где рассматривается работа торцевой двери как в ручном, так и в автоматическом режиме:

$$P_{c6} = [1 - (1 - P_{B1}) \cdot (1 - P_{B1(H)})] \cdot [1 - (1 - P_{B2}) \cdot (1 - P_{B2(H)})] \cdot (6 \cdot P_m^5 - 5 \cdot P_m^6).$$

Расчет параметра потока отказов для структурных схем вагонокомплекта

Произведем оценку параметра потоков отказов для структур, представленных на рис. 4б, 5а-в. Среднюю наработку до отказа системы можно представить в следующем виде:

$$T = \int_0^{\infty} P(t) dt = \int_0^{\infty} [1 - (1 - e^{-\lambda t})^n] dt,$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы.

Осуществим замену переменных

$$1 - e^{-\lambda t} = x \Rightarrow t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{1}{1-x} \Rightarrow dt = \frac{1}{\lambda(1-x)} dx.$$

Тогда

$$T = \frac{1}{\lambda} \int_0^{\infty} \frac{1-x^n}{1-x} dx = \frac{1}{\lambda} \int_0^{\infty} \frac{-(x-1)(x^{n-1} + x^{n-2} + \dots + x + 1)}{1-x} dx = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{x^n}{n} \Big|_0^1 + \frac{x^{n-1}}{n-1} \Big|_0^1 + \dots + \frac{x^2}{2} \Big|_0^1 + x \Big|_0^1 \right) = \frac{1}{\lambda} \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{n} \right).$$

Табл.1. Результаты расчета параметров потоков отказов для разных структурных схем вагонокомплекта

Тип схемы	Графическое отображение	Значение параметра потока отказов, λ , км ⁻¹
Резервирование боковых автоматических дверей ручными		$\lambda_c = 5,5566 \times 10^{-6}$
Система «3 из 4» с последовательно соединенными торцевыми дверями		$\lambda_c = 6,1917 \times 10^{-6}$
Система «5 из 6», в которой учитывается возможная работа дверей с электромеханическим приводом в ручном режиме		$\lambda_c = 7,88 \times 10^{-6}$
Система «5 из 6», в которой учитывается возможная работа боковых и торцевых дверей с электромеханическим приводом в ручном режиме		$\lambda_c = 6,7694 \times 10^{-6}$

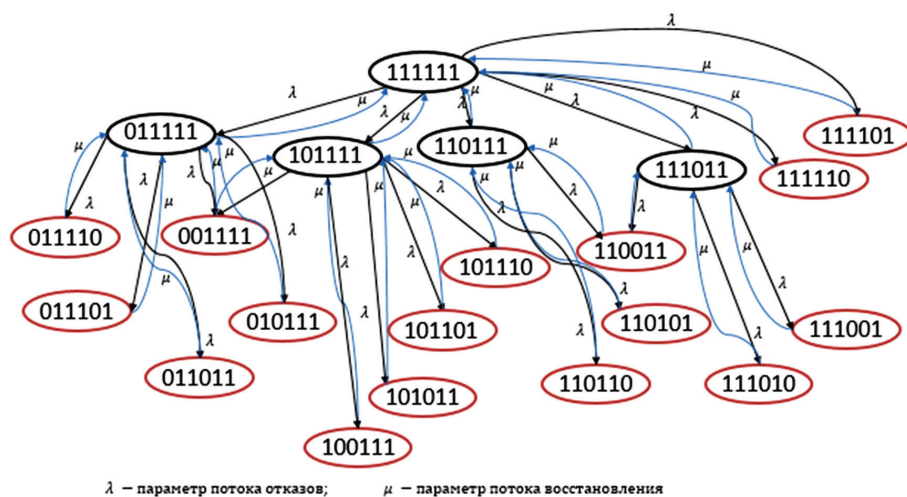


Рис. 6. Граф состояний для структуры «3 из 4» с последовательно соединенными торцевыми дверями.

Таким образом, для системы « m из n » получаем

$$T = \frac{1}{\lambda} \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n-1} + \frac{1}{n-2} + \dots + \frac{1}{m} \right). \quad (3)$$

Исходными данными для расчета являются значения параметра потока отказов одной двери $\lambda = 1,667 \times 10^{-6}$ 1/км и параметра потока восстановления $\mu = 0,041$ 1/км.

Подставив в (3) численные значения, получаем следующие результаты, сведенные в табл. 1.

Получили ряд значений параметров потоков отказов в зависимости от того, какую из структурных схем надежности можно принять для рассмотрения. Группой инженеров, принимающих участие в работе с данным типом дверей на разных стадиях жизненного цикла, была принята для расчета схема «3 из 4» (рис. 5а).

В силу того, что логико-вероятностный подход хоть и достаточно удобен для расчета, однако не учитывает процесса восстановления дверей, был рассмотрен вариант расчета параметра потока отказов с помощью марковских процессов.

Расчет параметра потоков отказов вагонокомплекта на основе марковских случайных процессов

Произведем оценку показателей надежности вагонкомплекта дверей для структуры «3 из 4» с последовательно соединенными торцевыми дверьми на основе марковского анализа. После определения состояния системы с помощью известных для дверей значений *плотностей вероятностей переходов* λ и μ , построим граф состояний для данной структуры (рис. 6).

Далее составим систему дифференциальных уравнений Колмогорова, где число уравнений в системе будет равно числу состояний:

$$\begin{aligned}
\frac{dP_{111111}}{dt} &= -6\lambda P_{111111} + \mu [P_{011111}(t) + P_{101111}(t) + P_{101111}(t) + P_{111011}(t) + P_{111011}(t) + P_{111101}(t)]; \\
\frac{dP_{011111}}{dt} &= -(5\lambda + \mu) P_{011111} + \mu [P_{011110}(t) + P_{011101}(t) + P_{001111}(t) + P_{010111}(t) + P_{011011}(t)] + \lambda P_{111111}(t); \\
\frac{dP_{101111}}{dt} &= -(5\lambda + \mu) P_{101111} + \mu [P_{101111}(t) + P_{100111}(t) + P_{101011}(t) + P_{101101}(t) + P_{101110}(t)] + \lambda P_{111111}(t); \\
\frac{dP_{110111}}{dt} &= -(5\lambda + \mu) P_{110111} + \mu [P_{110111}(t) + P_{100111}(t) + P_{110110}(t) + P_{110101}(t) + P_{110011}(t)] + \lambda P_{111111}(t); \\
\frac{dP_{111011}}{dt} &= -(5\lambda + \mu) P_{111011} + \mu [P_{011011}(t) + P_{101011}(t) + P_{110011}(t) + P_{111010}(t) + P_{111001}(t)] + \lambda P_{111111}(t); \\
\frac{dP_{111101}}{dt} &= -\mu P_{111101}(t) + \lambda P_{111111}(t); \\
\frac{dP_{111110}}{dt} &= -\mu P_{111110}(t) + \lambda P_{111111}(t); \\
\frac{dP_{011110}}{dt} &= -\mu P_{011110}(t) + \lambda P_{011111}(t); \\
\frac{dP_{101110}}{dt} &= -\mu P_{101110}(t) + \lambda P_{101111}(t); \\
\frac{dP_{110110}}{dt} &= -\mu P_{110110}(t) + \lambda P_{110111}(t); \\
\frac{dP_{001111}}{dt} &= -2\mu P_{001111}(t) + \lambda [P_{011111}(t) + P_{101111}(t)]; \\
\frac{dP_{010111}}{dt} &= -2\mu P_{010111}(t) + \lambda [P_{011111}(t) + P_{101111}(t)]; \\
\frac{dP_{100111}}{dt} &= -2\mu P_{100111}(t) + \lambda [P_{011111}(t) + P_{101111}(t)]; \\
\frac{dP_{110111}}{dt} &= -2\mu P_{110111}(t) + \lambda [P_{011111}(t) + P_{101111}(t)]; \\
\frac{dP_{011011}}{dt} &= -2\mu P_{011011}(t) + \lambda [P_{101111}(t) + P_{110111}(t)]; \\
\frac{dP_{101101}}{dt} &= -2\mu P_{101101}(t) + \lambda [P_{101111}(t) + P_{110111}(t)]; \\
\frac{dP_{111010}}{dt} &= -2\mu P_{111010}(t) + \lambda [P_{110111}(t) + P_{110111}(t)]; \\
\frac{dP_{110110}}{dt} &= -2\mu P_{110110}(t) + \lambda [P_{110111}(t) + P_{110111}(t)]; \\
\frac{dP_{111001}}{dt} &= -2\mu P_{111001}(t) + \lambda [P_{110111}(t) + P_{110111}(t)]; \\
\frac{dP_{110101}}{dt} &= -\mu P_{110101}(t) + \lambda P_{110111}(t); \\
\frac{dP_{110110}}{dt} &= -\mu P_{110110}(t) + \lambda P_{110111}(t); \\
\frac{dP_{111001}}{dt} &= -\mu P_{111001}(t) + \lambda P_{111011}(t); \\
\frac{dP_{111010}}{dt} &= -\mu P_{111010}(t) + \lambda P_{111011}(t).
\end{aligned}$$

Используя математический пакет MATLAB, произведем оценку вероятности безотказной работы системы. Получим $P = 0,9917$. Данное значение вероятности рассчитано на период, равный сроку службы рассматриваемых дверей.

Воспользуемся более простым методом расчета показателей безотказности. Для этого применим преобразование Лапласа для системы дифференциальных уравнений [8]:

$$\begin{aligned} \frac{dP_{111111}}{dt} &= -6\lambda P_{111111}(t) + \mu \left[P_{011111}(t) + P_{101111}(t) + P_{110111}(t) + P_{111011}(t) \right]; \\ \frac{dP_{011111}}{dt} &= -(5\lambda + \mu)P_{011111}(t) + \lambda P_{111111}(t); \\ \frac{dP_{101111}}{dt} &= -(5\lambda + \mu)P_{101111}(t) + \lambda P_{111111}(t); \\ \frac{dP_{110111}}{dt} &= -(5\lambda + \mu)P_{110111}(t) + \lambda P_{111111}(t); \\ \frac{dP_{111011}}{dt} &= -(5\lambda + \mu)P_{111011}(t) + \lambda P_{111111}(t). \end{aligned}$$

Применяем преобразования Лапласа [8, 11] для получения выражения для средней наработки на отказ, и из него уже производим расчет численного значения параметра потока отказов. Для $P(t)$ будем иметь следующее представление:

$$P(z)=\int_0^{\infty} P(t)e^{-zt} dt.$$

Тогда получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} -1 = -6\lambda T_{111111} + \mu [T_{011111} + T_{101111} + T_{110111} + T_{111011}]; \\ 0 = -(5\lambda + \mu)T_{011111} + \lambda T_{111111}; \\ 0 = -(5\lambda + \mu)T_{101111} + \lambda T_{111111}; \\ 0 = -(5\lambda + \mu)T_{110111} + \lambda T_{111111}; \\ 0 = -(5\lambda + \mu)T_{111011} + \lambda T_{111111}. \end{cases}$$

В результате решения данной системы получаем:

$$\lambda_{\text{сигт}} = 3,334 \times 10^{-6} \text{ 1/км при } \lambda = 1,667 \times 10^{-6} \text{ 1/км и } \mu = 0,041 \text{ 1/км.}$$

Таким образом, на основе методов марковского анализа и преобразования Лапласа было рассчитано нормируемое значение параметра потока отказов вагонокомплекта дверей на основе данных о параметрах потоков отказов и восстановлений одной двери.

Заключение

В статье проработаны различные структурные схемы для расчета показателей безотказности вагонкомплекта дверей пассажирского поезда. В отличие от логико-вероятностного подхода в определении параметра потока отказов, метод с применением марковских

процессов, является приоритетным, так как учитывает фактор восстановления. Таким образом, последнее значение параметра потока отказа системы применимо для рассматриваемой структурной схемы надежности «3 из 4» для мониторинга показателей безотказности вагонокомплектов дверей при эксплуатационных испытаниях.

Рассмотренные в статье подходы позволяют заказчику компонентов подвижного состава и изготовителю согласовать методики расчета надежности сложных систем и избежать применения противоречащих друг другу вариантов расчета показателей безотказности при переходе от элемента к системе. Описанный метод на данный момент используется для расчета нормируемого значения средней наработки на отказ вагонокомплекта дверей, установленных в вагоны скоростных поездов дальнего следования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-31-70001.

Библиографический список

1. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. 524 с.
2. Шишмарев В.Ю. Надежность технических систем. М.: Издательский дом «Академия», 2010. 304 с.
3. Атовмян И.О., Вайрадян А.С., Руднев Ю.П. и др. Надежность автоматизированных систем управления. М.: Высшая школа, 1979. 288 с.
4. ГОСТ Р 51901.14-2007 Менеджмент риска. Структурная схема надежности и булевы методы. М.: Стандартинформ, 2008. IV, 23 с.
5. Викторова В.С., Степанянц А.С. Модели и методы расчета надежности технических систем. М.: ЛЕНАНД, 2014. 219 с.
6. Bernd Bertsche. Reliability in Automotive and Mechanical Engineering. Springer, 2008. 502 p.
7. Marvin Rausand. Reliability of safety-critical systems: theory and application. Wiley, 2014. 468 p.
8. Голинкевич Т.А. Прикладная теория надежности. М.: Высшая школа, 1977. 160 с.
9. Половко А.М. Основы теории надежности. М.: Наука, 1964. 448 с.

10. Дружинин Г.В. Надежность систем автоматики. 2 изд. М.: «Энергия», 1967. 528 с.

11. Воронов А.А. Теория автоматического управления. 2 изд. М.: Высшая школа, 1986. 504 с.

Сведения об авторах

Мария Владимировна Белоусова – аспирант кафедры моделирования экономических систем, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: 27bmw1993@mail.ru

Виталий Владимирович Булатов – кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики и робототехники, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: bulatov-vitaly@yandex.ru

Николай Васильевич Смирнов – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой моделирования экономических систем, Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: n.v.smirnov@spbu.ru

Вклад авторов в статью

Белоусова М.В. Реализовала расчет параметров потока отказов для структурных схем вагонокомплекта, разработала граф-состояний для структуры вагонокомплекта «3 из 4», оценила показатели надежности для вагонокомплекта на основе марковских случайных процессов.

Булатов В.В. Описал объект исследования, концептуально оценил применимость приводимых математических методов для рассматриваемых систем подвижного состава и разработал структурные схемы надежности для вагонокомплекта пассажирского вагона.

Смирнов Н.В. Совместно с Белоусовой М.В. сформулировал математическую постановку задачи, проверил корректность всех рассуждений и выкладок, предложил интерпретацию полученных результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Моделирование сортировочных станций железнодорожной сети методами теории массового обслуживания

Маким Л. Жарков^{1*}, Михаил М. Павидис²

¹Институт динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН, Иркутск, Российская Федерация,

²Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Российская Федерация

*zharkm@mail.ru



Маким Л. Жарков



Михаил М. Павидис

Резюме. Цель. Основной целью статьи является моделирование работы транспортных систем на железнодорожном транспорте с использованием теории массового обслуживания на примере сортировочных станций. Целями также являются развитие методов и инструментальных средств математического моделирования и теории массового обслуживания. **Методы.** Одной из актуальных проблем современной науки является разработка методов математического моделирования транспортных систем с целью анализа эффективности, устойчивости и надежности их работы при учете случайных факторов. Проведенные исследования показали, что применение наиболее разработанного класса такого рода моделей – однофазных Марковских систем массового обслуживания – не позволяет адекватно описать транспортные объекты и системы вообще, и на железнодорожном транспорте – в частности. По этой причине в настоящей статье предлагаются к использованию более сложные математические модели, которые имеют вид сетей массового обслуживания, т.е. множеств взаимосвязанных систем массового обслуживания, где обслуживаются заявки. Граф сети массового обслуживания не обязан быть связным и ациклическим (деревом), что обеспечивает возможность для моделирования транспортных систем с произвольной структурой, которая задается таблично в виде так называемой «маршрутной матрицы». Для описания входящих транспортных потоков нами предлагается использовать модель ВМАР: Branch Markovian Arrival Process, иначе говоря, групповой марковский входящий поток, который представляет собой пуассоновский процесс с групповым поступлением заявок. Это позволяет соединить несколько различных потоков заявок в единую структуру, что, в свою очередь, существенно повышает адекватность моделирования. Сложная структура построенной модели не позволяет проводить ее исследование аналитическими методами. Поэтому на основе математического описания разработана и программно реализована имитационная модель. **Результаты.** Проведена апробация разработанного модельно-алгоритмического аппарата на примере крупнейшей российской сортировочной станции. Выполнен вычислительный эксперимент, по результатам которого сформированы содержательные рекомендации. Помимо этого, важным результатом проведенного исследования является то, что удалось существенно продвинуться в создании единой методики математического и компьютерного моделирования транспортных хабов с использованием теории массового обслуживания. Это является стратегической целью проводимых исследований и должно будет повысить точность и адекватность моделирования по сравнению с известными методами, а также позволит расширить возможности и раздвинуть границы применимости модельного подхода. **Выводы.** Предложенный модельный подход показал себя достаточно эффективным инструментом, позволяющим изучать работу железнодорожных сортировочных станций при различных параметрах входящих потоков и различной перерабатывающей способности станции. Он вряд ли сможет полностью вытеснить традиционные методы исследования работы железнодорожных станций, основанные на построении их детального описания. Однако проведенное исследование показывает, что он вполне пригоден в качестве инструмента первичного анализа, для применения которого не требуется больших трудозатрат и подробных статистических данных.

Ключевые слова: транспорт, железнодорожная сортировочная станция, математическое моделирование, теория массового обслуживания, сеть массового обслуживания, имитационное моделирование, вычислительный эксперимент, надежность.

Для цитирования: Жарков М.Л., Павидис М.М. Моделирование сортировочных станций железнодорожной сети методами теории массового обслуживания // Надежность. 2021. №3. С. 27-34. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-3-27-34>

Поступила 27.01.2021 г. / После доработки 09.02.2021 г. / К печати 17.09.2021 г.

Введение

Применение теории массового обслуживания [1] для моделирования транспортных систем различного уровня в последние годы является одним из важных и актуальных научных направлений, поскольку позволяет оценивать эффективность, устойчивость и надежность работы транспорта при учете случайных факторов. При этом традиционный подобный рода инструментарий однофазных Марковских систем массового обслуживания (СМО) оказался неудовлетворительным, поскольку а) в транспортных системах обслуживание, за редким исключением, производится в несколько этапов (фаз); б) поступающие транспортные единицы нельзя считать отдельными заявками, поскольку они могут иметь сложную структуру и различную мощность. Например, таковы железнодорожные составы, поступающие на грузовую или сортировочную станцию (СС) – вагонов в поезде может быть разное количество и типы их также, как правило, различны [2]. Таким образом, возникает необходимость применения более сложного модельного подхода с использованием немарковских и/или многофазных СМО, а также сетей массового обслуживания (СеМО). При этом, поскольку подобные математические объекты с трудом поддаются аналитическому исследованию, требуется также разработка алгоритмического и программного инструментария, позволяющего проводить компьютерное моделирование.

Обзор источников

О возможности применения двухфазных СМО для моделирования железнодорожных станций упоминается еще в монографии [2], однако в то время каких-либо систематических исследований в указанном направлении не было проведено; возможно, причиной стала недостаточная разработанность математического аппарата. Ситуация изменилась в XXI веке. Так, в иркутской научной школе под руководством ак. И.В. Бычкова и проф. РАН А.Л. Казакова, к которой принадлежат авторы статьи, более 10 лет развивается [3] научное направление, связанное с применением многофазных СМО в качестве модели обработки входящего потока в транспортном узле. При этом последние могут иметь совершенно различную природу: от транспортно-пересадочного узла (ТПУ) мегаполиса [4] до грузовой железнодорожной станции общего пользования [3]. Такого рода работы встречаются также и за рубежом [5–7]. В [5] теория массового обслуживания (ТМО) используется для определения пропускной способности железнодорожных линий, в работах [6] – для математического описания работы железнодорожных станций и других элементов железнодорожной инфраструктуры, в статье [7] – для моделирования работы железнодорожных узлов. Тем не менее, гораздо чаще ТМО используется в сфере информационно-телекоммуникационных технологий.

Существует большое количество научных школ и коллективов, проводящих исследования в данном направлении. Упомянем три из них, которые, по мнению авторов, занимают ведущие позиции на территории бывшего СССР: московская, под руководством проф. В.В. Рыкова (см., например, [8–10]), томская, под руководством проф. А.А. Назарова (см., например, [11–13]) и белорусская, под руководством проф. А.Н. Дудина (см., например, [14–16]). Разумеется, данный перечень можно было бы продолжить, однако обзор научных результатов в области применения ТМО для моделирования информационных систем и технологий не может быть дан в рамках настоящей статьи и не входит в ее цели.

Возвращаясь к работам иркутских ученых, отметим, что, как показывают результаты моделирования, общие черты, присущие всем транспортным системам, в данном случае преобладают над различиями и позволяют рассматривать их с единых позиций. Хотя, разумеется, любой модельный подход требует настройки под изучаемый объект, что позволяет учесть структуру и направление движения внутренних транспортных потоков.

Отдельного обсуждения заслуживают транспортные потоки, поступающие извне [17]. В качестве модели, позволяющей передать их сложную и неоднородную структуру, нами предложено использовать модель *BMAP* (Branch Markovian Arrival Process, т.е. групповой марковский входящий поток), который позволяет соединить несколько различных потоков заявок в один [14]. Фактически, речь идет об обобщенном случае пуассоновского потока, в котором заявки прибывают группами. Данная модель была впервые предложена итальянским математиком Д. Лукантони еще в 1991 году [18], однако ранее применялась только для моделирования информационных систем [16].

На базе трехфазных СМО авторами, помимо упомянутых уже ТПУ (в Москве и Екатеринбурге), и грузовых станций общего пользования [3], были построены математические модели работы СС [19–21]. Результаты были апробированы на примере конкретных транспортных объектов, расположенных как в России, так и за рубежом, и вызвали интерес специалистов-транспортников. Однако проявилась и слабая сторона предложенного подхода, связанная с тем, что аппарат многофазных СМО пригоден только для описания систем с линейной структурой. В них невозможна организация кольцевых маршрутов движения заявок, что, в частности, характерно для некоторых СС.

Методы

Для решения указанных выше проблем и расширения возможностей модельного подхода мы предлагаем использовать новый класс объектов – сети массового обслуживания [21, 22]. Под СеМО понимают множество взаимосвязанных СМО, в которых циркулируют (обслуживаются) заявки [22, 23]. В отличие от многофазных СМО, граф СеМО не обязан являться связным и ацикли-

ческим (деревом), что обеспечивает значительно больше возможностей для моделирования транспортных систем со сложной структурой, которая задается «маршрутной матрицей». К сожалению, расширение возможностей модельного аппарата в данном случае имеет и обратную сторону: происходит принципиальное усложнение изучаемого объекта. Если для многофазных СМО удастся в некоторых случаях получить аналитические результаты, то для СеМО доступно только численное исследование с использованием методов имитационного моделирования [24], основанных на разыгрывании единичного жребия (методы Монте-Карло).

Настоящая статья является прямым продолжением работы [21]. Основываясь на предложенной ранее концепции моделирования железнодорожных транспортных систем, авторы предлагают методику моделирования СС на основе СеМО, тем самым развивая полученные ранее результаты по моделированию указанных транспортных объектов на базе СМО [19]. В частности, нами разработаны соответствующие численные алгоритмы, которые реализованы в виде программной системы, позволяющей выполнять исследование свойств и оценку параметров многофазных систем и сетей массового обслуживания за счет специально организованного компьютерного эксперимента, основанного на методах статистического моделирования. В порядке апробации предложенного подхода рассмотрена модельная станция. Проведен вычислительный эксперимент, сделаны содержательные выводы об особенностях функционирования станции.

Математическая модель

Как известно, сортировочный комплекс представляет собой сложную структуру. Он нацелен на массовое расформирование грузовых поездов на отдельные группы вагонов, их обработку и накопление, а также формирование новых поездов из них. СС выполняют стандартные операции и состоят из схожих элементов. Выделим наиболее существенные из них, которые будут учтены в математической модели. Типовые СС выполняют следующие действия: прием поездов в парк прибытия (ПП) и отцепка от них локомотива; расформирование состава на сортировочной горке (СГ); накопление вагонов в сортировочном парке (СП), согласно плану формирования поездов; выставление состава в парк отправления (ПО), подключение к нему локомотива и отправление готового поезда из системы. В каждом парке и на СГ имеются обслуживающие устройства с различными перерабатывающими способностями и вместимостями. Входящий на станцию поездопоток в своем составе имеет транзитные, местные и другие категории поездов, параметры которых могут существенно различаться. При этом поезда прибывают с нескольких направлений (от двух и более). Поступающий состав необходимо рассматривать как группу заявок на обслуживание, так как вагоны обслуживаются независимо

друг от друга и занимают определенное место на путях в парках. Следовательно, общий входящий поездопоток состоит, как минимум, из четырех подпотоков, каждый из которых является групповым. Пассажирские поезда обычно следуют мимо СС и в модели не учитываются.

Значительную часть входящего поездопотока составляют транзитные поезда, которые следуют по всей территории РФ. Эта группа подвержена большому влиянию случайных факторов из-за огромной дальности следования, поэтому диспетчерское управление не может эффективно планировать расписание для всех категорий поездов на отдельном участке железнодорожной сети. Следствием этого является появление существенных отклонений движения поездов от расписания [25]. По этой причине можно принять, что время поступления поездов является случайной величиной.

Построение математической модели СС происходит в два этапа. На первом описывается входящий поток заявок. Для этого применяется модель *ВМАР*-потока, позволяющая объединить несколько различных потоков заявок в единую структуру. На втором описывается обслуживание заявок в системе. Для учета сложной иерархической структуры системы предлагается использовать СеМО.

ВМАР-поток (Batch Markovian Arrival Process) отличается от простейшего потока с групповым поступлением заявок тем, что: а) интенсивность поступления групп заявок λ_v зависит от номера состояния управляющей цепи Маркова v с непрерывным временем и конечным пространством состояний $\{0, 1, \dots, W\}$; б) время пребывания цепи Маркова v в состоянии v имеет показательное распределение с параметром λ_v ; в) после того как время пребывания цепи в состоянии v закончится, она с заданной вероятностью $p_k(v, v')$ переходит в другое состояние v' , и при этом генерируется группа размера $k \geq 0$; г) вероятности переходов $p_k(v, v')$ удовлетворяют условию нормировки $\sum_{k=0}^{\infty} \sum_{v=0}^W p_k(v, v') = 1$. Интенсивности переходов цепи Маркова удобно хранить в матрицах

$$(D_0)_{v,v'} = -\lambda_v, v = \overline{0, W}; (D_0)_{v,v'} = \lambda_v p_0(v, v'), v, v' = \overline{0, W}; (D_k)_{v,v'} = \lambda_v p_k(v, v'), v, v' = \overline{0, W}, k \geq 1. \quad (1)$$

СеМО представляют собой совокупность конечного числа S СМО (далее – узлов), в которой заявки переходят из одного узла в другой, в соответствии с маршрутной матрицей P [22, 23]. Примем, что заявки поступают в СеМО из внешнего источника. Если принять его за дополнительный узел с индексом 0, то маршрут заявки определяется стохастической матрицей $P = \|P_{ij}\|$ размера $(S+1) \times (S+1)$. Ее элементы P_{ij} – вероятности перехода заявки из узла i в узел j ($i, j = \overline{1, S}$), P_{0j} и P_{j0} – соответственно, вероятность поступления в j -й узел заявки из источника и вероятность покидания заявкой сети после обслуживания в j -м узле ($j = \overline{1, S}$). Очевидно, что $\sum_{j=0}^S P_{ij} = 1$ ($i = \overline{0, S}$), $P_{00} = 0$ [22, 23].

Моделирование сортировочной станции

Рассмотрим модельную сортировочную станцию (МСС). Ее характеристики соответствуют СС Екатеринбург-Сортировочный (Е-С), которая располагается на Свердловской железной дороге и является крупнейшей СС в России. Е-С является двухсистемной СС с последовательным расположением парков и обрабатывает поезда с пяти направлений: 1) Тагильское, 2) Кунгурское, 3) Казанское, со станций 4) Екатеринбург-Товарный и 5) Екатеринбург-Пассажирский. Нечетная система обслуживает направления 4) и 5), четная – 1), 2), 3). Обе системы практически идентичны по выполнению операций. Четная система в настоящее время проходит модернизацию и параметры ее работы нам неизвестны. Поэтому в МСС используем характеристики нечетной системы (см. рис. 1): в ПП располагается 11 специализированных путей для приема грузовых поездов с общей вместимостью 716 условных вагонов (усл. ваг.) и работает два локомотива надвига, которые переставляют поезда на СГ по двум путям вместимостью около 100 усл. ваг.; СГ обладает большой мощностью и способна переработать до 5500 усл. ваг. в сутки; СП имеет 35 путей с общей вместимостью 2535 усл. ваг., в формировании участвует три локомотива, которые переставляют поезда в ПО; он имеет 15 путей с общей вместимостью 980 усл. ваг, поезда из него отправляются на три направления. Длины путей в парках разные, наиболее протяженные из них вмещают от 80

и более усл. ваг. На станцию Е-С поступает вагонопоток, включающий три категории поездов: а) транзит с переработкой; б) транзит без переработки; в) местный. Поезда категорий а) и в) поступают в парк прибытия и после проходят все оставшиеся этапы обслуживания. Поезда категории б) на станции обслуживаются в ПП или в ПО, затем покидают систему.

При подготовке статьи [25] нами были собраны статистические данные о поездах на Свердловской железной дороге, в частности, для грузовых поездов: фактическое и плановое время прибытия на станцию, число вагонов в поездах и их номера. Возможно, они отчасти устарели, однако нам не удалось получить более свежие данные, поэтому далее при моделировании станции мы будем опираться на имеющиеся сведения. Они свидетельствуют о том, что в половине случаев отклонение от графика у грузовых поездов превышает 30 минут и более двух часов в 28% случаев. Следовательно, можно принять, что время между поступлением поездов на станцию является случайной величиной. Число вагонов в транзитных и большей части местных грузовых поездах подчиняется биномиальному распределению $B(80, 0,9)$, среднее их число – 70, а максимальное – 80 для всех категорий.

На СС основным устройством, от которого зависит производительность системы, считается СГ. От ее мощности рассчитывается объем вагонопотока, который станция может обработать. Мы не смогли получить статистические данные о входящем поездопотоке, поэтому подберем объем прибывающих в расформирование поез-

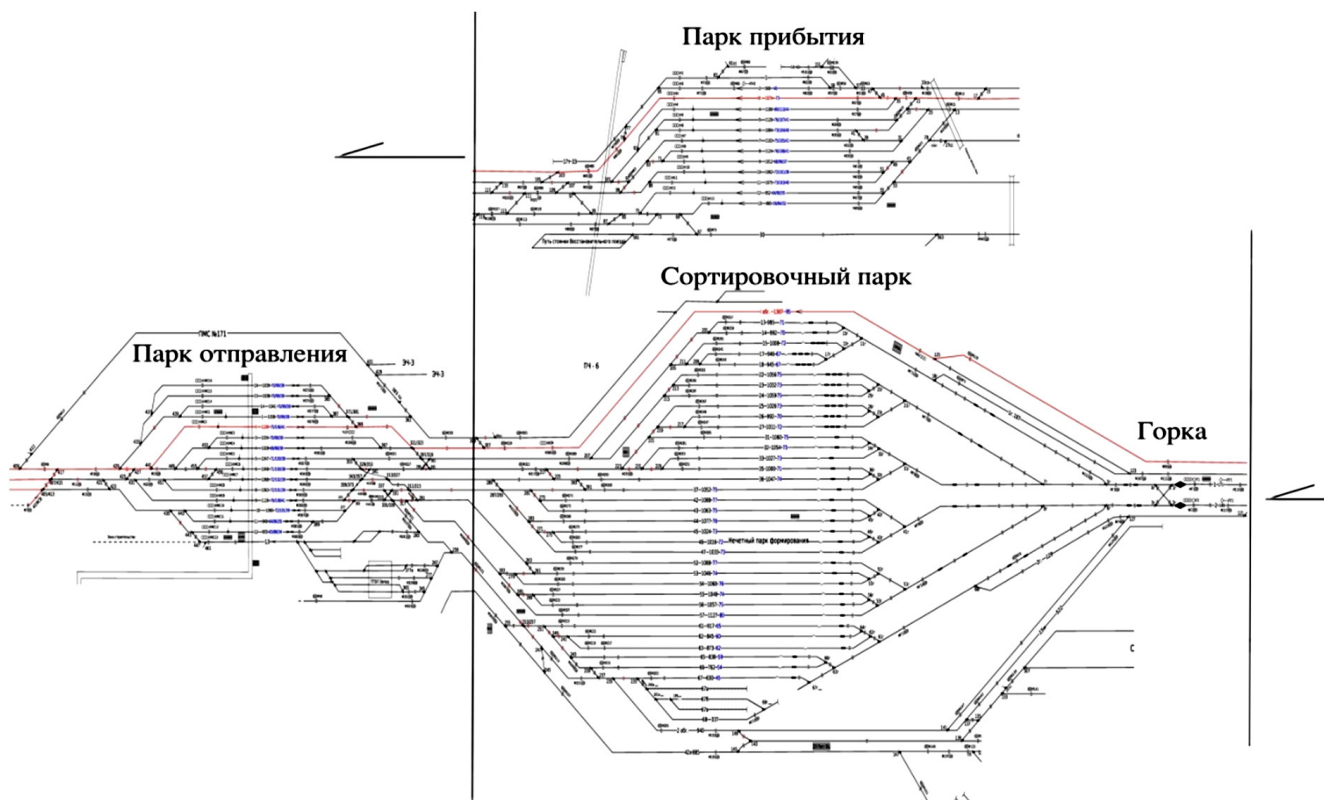


Рис. 1. Нечетная система сортировочной станции Е-С

дов так, чтобы загрузка СГ составила 70% от максимальной возможной. Этот показатель соответствует средней плановой загрузке для таких объектов. Тогда в систему должно поступать 3850 вагонов в сутки или 55 поездов. Количество поездов без расформирования примем равным четверти от числа в расформирование, т.е. 14 в сутки. Получаем, что в МСС прибывает по 69 грузовых поездов с двух направлений в сутки, т.е. 35 поездов с направления 4) и 34 с 5). В модели мы разделяем поезда по технологии обработки на станции: в расформирование (поезда А) и без расформирования (поезда Б) и по направлению. Таким образом, входящий вагонопоток будет состоять из четырех групповых подпотоков. Для математического описания такого вагонопотока применим модель *ВМАР*-потока. Она будет включать 81 матрицу D_k , $k = \overline{0,80}$, размера 4×4 . Их элементы вычисляются по формулам (1), где $\lambda_0 = \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda = 69 / 24 = 2,875$, $p_0 = 28 / 69 = 0,41$, $p_2 = 27 / 69 = 0,39$, $p_1 = p_3 = 7 / 69 = 0,1$, $p_k(v, v') = p_{v'} f(k)$, $v, v' = \overline{0,3}$, $k = \overline{0,80}$, здесь $f(k)$ – вероятность поступления группы вагонов размера k , их размеры подчиняются закону $B(80, 0,9)$.

Модель МСС в виде СеМО следующая. Система имеет четыре узла обслуживания: 1) в ПП каналами мы примем два локомотива надвига, очередь – пути парка, тогда Узел 1 – СМО с двумя каналами и очередью на 716 мест; 2) на СГ мы примем, что один путь надвига и сортирующее устройство являются одним каналом, второй путь – очередью, тогда Узел 2 – СМО с одним каналом и очередью на 100 мест; 3) в СП каналами являются три локомотива, очередь – пути парка, тогда Узел 3 – трехканальная СМО с очередью на 2535 мест; 4) в ПО каналами мы считаем три пути отправления (три направления), очередь – пути парка, тогда Узел 4 – трехканальная СМО с очередью на 980 мест. Время обслуживания в каналах узлов мы примем случайной величиной, которая подчиняется нормальному закону распределения. Выбор объясняется тем, что персонал станции стремится приблизить продолжительность технических операций к нормативным значениям. Отклонения возникают из-за влияния случайных факторов. Примером может служить поезд, который имеет вагоны только с двумя или тремя направлениями (станциями назначений). Тогда он может быть расформирован на горке за 12 минут вместо стандартных 20. Параметры работы МСС представлены в табл. 1.

Табл. 1. Параметры работы каналов в подсистемах МСС

	Узел 1	Узел 2	Узел 3	Узел 4
F	$N(20, 2)$	$N(20, 3)$	$N(40, 5)$	$N(40, 3)$
X	$B(80, 0,9)$	$B(80, 0,9)$	$B(80, 0,9)$	$B(80, 0,9)$

Параметры работы каналов (см. табл. 1) определены на основе типового технологического процесса работы СС с учетом специфики станции Е-С. Временем обслуживания в Узле 1 мы считаем время надвига поездов на СГ из парка отправления и возвращение локомотива обратно. Интервал времени обслуживания составляет $[12,0; 28,0]$ минут, среднее – 20 минут. Перерабатывающая способность СГ (Узел 2) составляет 5500 усл. ваг. в сутки или 4 усл. ваг. в мин. Интервал времени обслуживания примем $[11,0; 29,0]$ минут. В Узле 3 (СП) временем обслуживания мы считаем время на прицепку локомотива к поезду, окончание формирования и перестановку его в ПП, а также возвращение локомотива в СП. Интервал времени обслуживания $[25,0; 55,0]$ минут, среднее – 40 минут. В ПО (Узел 4) учитываем времена прицепки локомотива к составу, сокращенного опробования тормозов и отправления поезда из системы. Среднее время обслуживания примем 40 минут, а интервал $[31,0; 49,0]$ минут.

В систему прибывают поезда А и Б. Первые поступают в Узел 1 и далее следуют по всей системе. Вторые принимаются в Узле 1 или Узле 4, затем обслуживаются и покидают систему. Для учета разного обслуживания поездов мы используем маршрутную матрицу. Примем, что поезда Б могут попасть в Узел 1 или Узел 4 с равной вероятностью $p_b = 0,5$. Тогда поезда из общего входящего потока поступают в Узел 4 с вероятностью $p_{0,4} = (2 \cdot 7 / 69)p_b = 0,1$, а в Узел 1 с вероятностью $p_{0,1} = 1 - p_{0,4} = 0,9$. После обслуживания в Узле 1 поезда Б покидают систему, вероятность этого равна $p_{1,0} = 7 / 62 = 0,11$. Поезда А переходят в Узел 2 с вероятностью $p_{1,2} = 1 - p_{1,0} = 0,89$, и далее следуют по Узлам 3 и 4. В терминах ТМО модель МСС будет иметь вид СеМО с маршрутной матрицей P , образованной указанными выше вероятностями, и следующими узлами: 0 – источник входящего потока; 1 – $ВМАР / G^B / 2 / 716$; 2 – $*/ G^B / 1 / 100$; 3 – $*/ G^B / 3 / 2535$; 4 – $*/ G^B / 3 / 980$, где B – биномиальное распределение, G – произвольный закон распределения времени обслуживания. Схема описанной СеМО представлена на рис. 2.

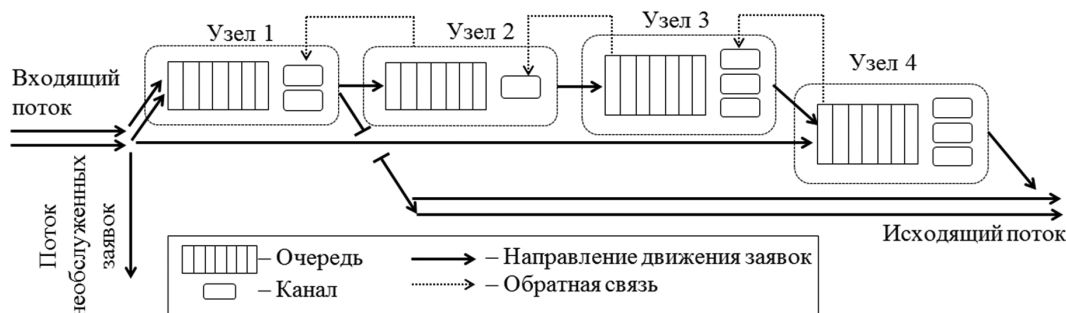


Рис. 2. Схема СеМО

Полученную СеМО исследуем численно с использованием имитационной модели [24]. Искомые характеристики – показателями эффективности – являются [1, 22, 23]: P_R и P_G – вероятности обслуживания заявки и группы заявок, $T_{\text{сyst}}$ – среднее время пребывания заявки в системе, l – средняя длина очереди, K – среднее число занятых каналов, t_{ph} – среднее время пребывания заявки в узле, t_{lock} – суммарное время блокировки всех каналов узла, P_{lock} – вероятность блокировки одного канала узла.

Вычислительный эксперимент. Далее в таблицах 2–4 представлены результаты сценарного моделирования работы, описанной выше СеМО (см. рис. 2), при различных параметрах входящего вагонопотока. В каждой таблице приведены средние результаты, которые получены за 10 пусков программы. Модельное время – пять недель для всех экспериментов – это минимальное время, за которое имитационная модель позволяет вычислить стационарные характеристики СеМО. Главным показателем того, что СеМО справляется с нагрузкой, является $P_R = 0$, что для крупных производственных и транспортных систем означает отсутствие риска появления нештатных ситуаций. Так, в частности, это указывает на то, что станция обслуживает все поезда и работа осуществляется в штатном режиме.

Эксперимент 1. В табл. 2 представлены результаты имитационного моделирования при интенсивности поступления вагонопотока $\lambda = 2,875$ групп в час.

Табл. 2. Результаты эксперимента 1

	Поступило	Потеряно	$T_{\text{сyst}}(м)$	P_G	P_R
Групп заявок	2431,80	0	161,76	0	0
Заявок	175199,20	0			
	K	l	$t_{ph}(м)$	$t_{lock}(м)$	P_{lock}
Узел 1	1,00	41,46	35,68	2897,00	0,05
Узел 2	0,74	24,77	32,61	0,00	0,00
Узел 3	1,43	0,00	42,43	0,00	0,00
Узел 4	1,59	26,55	51,05	-	-

Эксперимент 2. В табл. 3 представлены результаты имитационного моделирования при общем вагонопотоке 5880 вагонов или почти 84 поезда в сутки, из которых 17 без расформирования ($\lambda = 3,5$).

Табл. 3. Результаты эксперимента 2

	Поступило	Потеряно	$T_{\text{сyst}}(м)$	P_G	P_R
Групп заявок	2903,50	0	166,13	0	0
Заявок	209049,50	0			
	K	l	$t_{ph}(м)$	$t_{lock}(м)$	P_{lock}
Узел 1	1,23	61,10	39,20	4681,25	0,08
Узел 2	0,83	32,65	34,48	0,00	0,00
Узел 3	1,60	0,00	42,44	0,00	0,00
Узел 4	1,79	26,64	50,02	-	-

Эксперимент 3. В табл. 4 представлены результаты имитационного моделирования при интенсивности поступления групп заявок $\lambda = 4$ в час.

Табл. 4. Результаты эксперимента 3

	Поступило	Потеряно	$T_{\text{сyst}}(м)$	P_G	P_R
Групп заявок	3453,50	1,00	178,23	0,0003	0,0003
Заявок	248605,50	72,82			
	K	l	$t_{ph}(м)$	$t_{lock}(м)$	P_{lock}
Узел 1	1,50	111,15	48,60	7216,50	0,12
Узел 2	0,90	42,58	36,96	0,00	0,00
Узел 3	1,74	0,00	42,45	0,00	0,00
Узел 4	1,97	29,85	50,23	-	-

Обсуждение результатов моделирования

По результатам эксперимента 1 можно видеть, что среднее время пребывания заявки (вагона) в системе составляет 2,7 часа. Вероятность отказа равна нулю, т.е. вагонопоток принимается на станцию бесперебойно, что является важным показателем надежности железнодорожных перевозок. Таким образом, МСС успешно справляется с переработкой вагонопотока, обеспечена надежная и безотказная работа станции.

Эксперимент 2. Наиболее загруженным является Узел 1, поскольку среднее время блокировки его каналов составляет 2,2 часа в сутки, что не критично, но отрицательно сказывается на работе станции. В такой ситуации диспетчерский аппарат расставляет грузовые поезда на соседних железнодорожных станциях, где они ожидают освобождения пути в парке приема. Сортировочная станция работает в штатном режиме и справляется с нагрузкой, однако из-за увеличения времени блокировки каналов Узла 1 увеличивается срок доставки грузов, устойчивость работы транспортной системы обеспечена не в полной мере.

Эксперимент 3. По результатам моделирования видно, что каналы Узла 1 в среднем блокируются на 3,4 часа за сутки, что является критическим для системы, так как происходит переполнение очереди Узла 1 и вероятность отказа становится ненулевой, надежная и безотказная работа МСС не обеспечена.

По результатам всех экспериментов можно сделать следующий общий вывод. Система работает в штатном режиме при максимальной интенсивности входящего поездопотока $\lambda = 3,5$ поездов в час. Предельным значением работы станции является интенсивность входящего поездопотока $\lambda = 4$ поездов в час. Узким местом в системе является недостаточная вместимость парка прибытия (Узел 1). Для того чтобы его разгрузить, целесообразно перенаправить все поезда без переработки в Узел 4 (ПО). Для дальнейшего повышения производительности системы необходимо увеличить перерабатывающую спо-

состояние СГ. Однако это потребует ее реконструкции, связанной с существенными материальными затратами.

Заключение

Подводя итог проведенного исследования, отметим, что оно является лишь первым серьезным шагом на, как надеются авторы, длинном пути, финалом которого должно стать создание единой методики математического и компьютерного моделирования транспортных хабов с использованием СеМО. Это позволит повысить точность и адекватность моделирования, направленного на оценку эффективности, устойчивости и надежности работы транспортных систем, а также расширить возможности модельного подхода. Еще одной важной проблемой, которую необходимо решать при моделировании работы транспортных систем, является отчуждаемость программных продуктов от разработчиков. Наиболее естественным путем здесь является применение инструментов интеллектуализации в рамках создания интеллектуальной системы управления развитием транспортно-логистической инфраструктуры региона [26], которое проводится под руководством ак. И.В. Бычкова.

В заключение отметим, что предложенный модельный подход вряд ли сможет полностью вытеснить традиционные методы исследования работы железнодорожных станций, основанные на построении их детального описания. Однако в качестве инструмента первичного анализа, для применения которого не требуется больших трудозатрат и подробных статистических данных, он, как показывают наши результаты, вполне пригоден.

Благодарности

Авторы выражают благодарность профессору А.Л. Казакову за полезные советы при подготовке материала и помощь в написании статьи. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-010-00724; РФФИ и Правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-47-383002.

Библиографический список

1. Гнеденко Б.В., Коваленко И.Н. Введение в теорию массового обслуживания. М.: ЛКИ, 2007. 107 с.
2. Акулиничев В.М., Кудрявцев В.А., Корешков А.Н. Математические методы в эксплуатации железных дорог. М.: Транспорт, 1981. 223 с.
3. Казаков А.Л., Маслов А.М. Построение модели неравномерного транспортного потока на примере железнодорожной грузовой станции // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2009. № 3. С. 27–32.
4. Журавская М.А., Казаков А.Л., Жарков М.Л. и др. Моделирование работы транспортно-пересадочного узла мегаполиса как трехфазной системы массового обслуживания // Транспорт Урала. 2015. № 3. С. 17–22.

5. Weik N., Niebel N. Capacity analysis of railway lines in Germany – a rigorous discussion of the queueing based approach // Journal of Rail Transport Planning & Management. 2016. № 6 (2), P. 99–115.
6. Dorda M., Teichmann D. Modelling of Freight Trains Classification Using Queueing System Subject to Breakdowns // Mathematical Problems in Engineering. 2013. № 2013, 11 p.
7. Nießen N. Waiting and loss probabilities for route nodes // In Proceedings of the 5th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis. 2013; Copenhagen, Denmark.
8. Бронштейн О.И., Райкин А.А., Рыков В.В. Об одной системе массового обслуживания с потерями // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1964. № 4. С. 39–47.
9. Kitaev M.Yu., Rykov V.V. Controlled queueing system. N.Y.: CC Press, 1995.
10. Rykov V.V. Controllable queueing systems from the very beginning up to nowadays // Materials of Information Technologies and Mathematical Modelling named after A.F. Terpugov. 2017. № 1. P. 25–26.
11. Грачев В.В., Моисеев А.Н., Назаров А.А. и др. Многофазная модель массового обслуживания системы распределенной обработки данных // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2012. № 2-2 (26). С. 248–251.
12. Shklennik M., Moiseeva S., Moiseev A. Optimization of two-level discount values using Queueing tandem model with feedback // Communications in Computer and Information Science. 2018. № 912. P. 321–332.
13. Галилейская А.А., Лисовская Е.Ю., Моисеева С.П. и др. Моделирование процесса последовательной обработки данных, реализующей хранение резервной копии // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2019. № 3. С. 579–587.
14. Дудин А.Н., Клименок В.И. Системы массового обслуживания с коррелированными потоками. Минск: БГУ, 2000.
15. Kim C., Dudin A., Dudina O. et al. Tandem queueing system with infinite and finite intermediate buffers and generalized phase-type service time distribution // European Journal of Operational Research. 2014. № 23. P. 170–179.
16. Вишневецкий В.М., Дудин А.Н. Системы массового обслуживания с коррелированными входными потоками и их применение для моделирования телекоммуникационных сетей // Автоматика и телемеханика. 2017. № 8. С. 3–59.
17. Введение в математическое моделирование транспортных потоков / под ред. А.В. Гасникова. М.: МФТИ. 2010.
18. Lucantoni D.M. New results on single server queue with a batch Markovian arrival process // Commun. Statist. Stochastic Models. 1991. № 7. P. 1–46.
19. Казаков А.Л., Павидис М.М., Жарков М.Л. Применение многофазных систем массового обслуживания для моделирования сортировочной станции // Вестник

Уральского государственного университета путей сообщения. 2018. № 2. С. 4–14.

20. Казаков А.Л., Павидис М.М. Об одном подходе к моделированию работы сортировочных станций // Транспорт Урала. 2019. № 1 (60). С. 29–35.

21. Жарков М.Л., Павидис М.М. Моделирование железнодорожных станций на основе сетей массового обслуживания // Актуальные проблемы науки Прибайкалья № 3. Иркутск: ИГУ, 2020. С. 79–84.

22. Уолрэнд Д. Введение в теорию сетей массового обслуживания. М.: Мир, 1993. 336 с.

23. Ивницкий В.А. Теория сетей массового обслуживания. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 772 с.

24. Кельтон В.Д., Лоу А.М. Имитационное моделирование. СПб.: Питер, 2004.

25. Жарков М.Л., Парсюрова П.А., Казаков А.Л. Моделирование работы станций и участков железнодорожной сети на основе изучения отклонений от графика движения // Вестник ИргТУ. 2014. № 6 (89). С. 23–31.

26. Бычков И.В., Казаков А.Л., Лемперт А.А. и др. Интеллектуальная система управления развитием транспортно-логистической инфраструктурой региона // Проблемы управления. 2014. № 1. С. 27–35.

Сведения об авторах

Максим Леонидович Жарков – кандидат технических наук, научный сотрудник Института динамики систем и теории управления имени В.М. Матросова СО РАН, Шелехов, Иркутская обл., Российская Федерация, e-mail: zharkm@mail.ru

Михаил Максимович Павидис – аспирант Иркутского государственного университета путей сообщения, Иркутск, Российская Федерация, e-mail: pavidismiha1994@mail.ru

Вклад авторов в статью

Жаркову М.Л. принадлежит постановка задачи и разработка модельного подхода.

Павидисом М.М. были выполнены обзор источников, идентификация модели и вычислительный эксперимент, также сделаны содержательные выводы по результатам моделирования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Использование терминов «оценка» и «определение» в стандартах по надежности

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



Борис П. Зеленцов

Резюме. Статья направлена на совершенствование терминологии, которая используется в государственных стандартах в области надежности. Приведены примеры использования терминов «оценка» и «определение» в государственных стандартах серии «Менеджмент риска» и «Надежность в технике». Уточнены значения этих терминов на основе существующих нормативных документов. Сформулированы требования к безупречности используемых терминов. Предложены формулировки терминов, в которых использованы «оценка» и «определение». **Цель.** Целью статьи является рассмотрение и обсуждение привычных, но недостаточно обоснованных терминов «оценка» и «определение», используемых в государственных стандартах, то есть рассмотрение правомочности использования этих терминов при изложении государственных стандартов указанных серий. Также сформулированы предложения по совершенствованию использования рассматриваемых терминов. **Методы.** Приведены примеры использования терминов «оценка» и «определение» в государственных стандартах. На основе существующих государственных стандартов уточнены действительные значения рассматриваемых терминов: «определение» является синонимом «дефиниции», а «оценка» и «оценивание» непосредственно связаны с математической статистикой. Сформулированы требования к безупречности используемых терминов, которые сводятся к однозначности, непротиворечивости и согласованности с другими государственными стандартами. С этих позиций показаны недостатки использования рассматриваемых терминов, которые связаны с приведенными требованиями, а именно, не раскрыты смысл, содержание, сущность и основные особенности этих терминов. Также отсутствуют какие-либо комментарии или ссылки на другие нормативные документы. **Результаты.** В большинстве стандартов в разделе «Термины и определения» понятие «определение» использовано корректно: в этом разделе действительно приведены определения (дефиниции) терминов. Однако в других случаях понятие «определение» использовано в смысле, который отличен от этого, то есть никакие определения в указанном смысле не приведены. На основе требований к безупречности и с учетом отмеченных недостатков сформулированы предложения по замене рассматриваемых терминов. В большинстве случаев вместо терминов «оценка» и «определение» предложено использовать термины «расчет» и «вычисление», а также производные от этих терминов: «рассчитать», «вычислить». Следует отметить, что вслед за государственными стандартами эти термины используются в технической документации, в научных статьях, монографиях и учебниках. **Выводы.** При использовании рассматриваемых терминов в некоторых стандартах нарушена их безупречность: не соблюдаются требования рекомендаций по стандартизации, не соблюдаются однозначность и согласованность с другими стандартами. Опираясь на эти требования, в статье сформулированы предложения по совершенствованию использования терминов «оценка» и «определение». Предложенные варианты терминов следует рассматривать как предварительное мнение. Окончательное уточнение и/или замена этих терминов должны быть выработаны путем широкого обсуждения и принятия компромиссного решения.

Ключевые слова: надежность, терминология по надежности.

Для цитирования: Зеленцов Б.П. Использование терминов «оценка» и «определение» в стандартах по надежности // Надежность. 2021. №3. С. 35-38. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-3-35-38>

Поступила 26.02.2021 г. / После доработки 22.07.2021 г. / К печати 17.09.2021 г.

Введение

В данной статье рассмотрены термины, используемые в государственных стандартах серии «Менеджмент риска» и «Надежность в технике». В этих стандартах применяются термины «оценка» и «определение».

Целью данной статьи является рассмотрение правомерности использования этих терминов при изложении содержания стандарта.

Для обоснования использования терминов «оценка» и «определение» автор опирается на государственные стандарты [2, 3, 12]. Стандарт [3] был заменен на стандарт [2]. Однако при разработке и при использовании стандартов указанных серий до 2019 года действовал стандарт [3]. Поэтому в статье производится ссылка на оба стандарта из серии «Статистические методы», тем более что в части определения основных терминов существенного расхождения между ними нет.

Обзор источников

В большинстве государственных стандартов имеется раздел «Термины и определения». В частности, в этом разделе приведены:

- 16 терминов в [1] (ГОСТ Р 27.302-2009);
- 6 терминов в [4] (ГОСТ Р 51901.5-2005);
- 8 терминов в [5] (ГОСТ Р 51901.12-2007);
- 15 терминов в [9] (ГОСТ Р МЭК 61165-2019).

Если этот раздел является пустым, то приведена ссылка на другой государственный стандарт.

Термин «оценка» повсеместно использован в государственных стандартах. Отметим примеры использования этого термина:

- В [1] (ГОСТ Р 27.302-2009):
 - оценка безотказности (6.1.3, 6.13);
 - оценка вероятности (7.5.4.3);
 - оценка вентили (7.5.2.2);
 - оценка дерева неисправностей (6.1.2, 7);
 - оценить вероятность отказа (5.4.3).
- В [4] (ГОСТ Р 51901.5-2005):
 - оценка надежности (А.1.12.1);
 - оценка показателей надежности (4.1);
 - оценка улучшения надежности (4.1);
 - оценка характеристик основных событий (4.4.1).
- В [5] (ГОСТ Р 51901.12-2007):
 - оценка вероятности появления отказа (5.2.9);
 - оценка интенсивности отказа (5.3.4);
 - расчетная или оценочная вероятность появления вида отказа (5.3.6.2).
- В [7] (ГОСТ Р 51901.14-2007):
 - оценка вероятности безотказной работы (7.2, 8.3);
 - вероятность безотказной работы можно оценить с помощью формулы (8.1.1).
- В [9] (ГОСТ Р МЭК 61165-2019):
 - оценка вероятности безотказной работы (В.1).

Отметим случаи использования термина «определение»:

В [1] (ГОСТ Р 27.302-2009):

– вероятности определяют обычным способом (6.1.3).

В [4] (ГОСТ Р 51901.5-2005):

- определение числовых данных (4.1);
- определение показателей надежности (А.2.4.3).

В [5] (ГОСТ Р 51901.12-2007):

- определение вероятности появления вида отказа (5.2.9);
- определение интенсивности отказов (5.3.4).

В [7] (ГОСТ Р 51901.14-2007):

- определение вероятности безотказной работы (6.1).

В [9] (ГОСТ Р МЭК 61165-2019):

- определение показателей надежности (9.1);
- определение вероятностей состояний (9.1);
- определить характеристики системы (8.1);
- определение выражений для вероятности безотказной работы и наработки до отказа (С.3.2).

Совместное использование терминов «оценка» и «определение» отмечено в следующих случаях:

В [4] (ГОСТ Р 51901.5-2005):

- определение числовых оценок показателей надежности (4.1);
- определение количественной оценки показателей безотказности (А.1.12.1);
- определение оценок (А.1.12.1);
- определить оценку показателя надежности (А.1.12.1).

В [7] (ГОСТ Р 51901.14-2007):

- определение количественных оценок показателей безотказности (6.1).

В [9] (ГОСТ Р МЭК 61165-2019):

- определение оценок готовности (В.1);
- определение оценок показателей надежности (Раздел 1);
- определение оценки вероятности отказа (7.2).

Уточним значения терминов «определение» и «оценка». В Рекомендациях по стандартизации [12] сказано, что определение – это логический прием, позволяющий отличать, отыскивать и формулировать интересующее понятие. Этот логический прием представляет собой формулировку, раскрывающую смысл, содержание, сущность и основные особенности термина с использованием знакомых и осмысленных слов. В [12] сказано, что определение является исходной точкой для выбора соответствующего термина в качестве стандартизованного. Для лучшего понимания понятия «определение» некоторые авторы используют термин «дефиниция» [11].

В соответствии со стандартом [2] термин «оценка» – это статистика, используемая для оценивания параметра, который является признаком семейства распределений. «Оценивание» – это процедура, с помощью которой получают статистическое представление генеральной совокупности на основе случайной выборки, полученной из данной генеральной совокупности.

В стандарте [3] эти термины определены аналогично. Оценка – это статистика, используемая для оценивания параметра, а оценивание – операция определения на основе выборочных данных числовых значений параметров распределений. Статистика определена как

функция от выборочных значений, она является случайной величиной, которая может принимать различные значения от выборки к выборке. Параметр определен как величина, используемая в описании распределения вероятностей некоторой случайной величины.

Таким образом, в соответствии со стандартами [2] и [3] термины «оценка» и «оценивание» непосредственно связаны с математической статистикой.

Методы

В Рекомендациях по стандартизации [12] сказано, что терминология должна быть однозначно понимаемой и непротиворечивой. В этих Рекомендациях изложены требования, которым должен удовлетворять используемый термин. Термин должен выражать только одно понятие и одно понятие должно выражаться только одним термином. Два или более определений одного понятия не допускаются. Нарушением такого принципа являются многозначность (омонимия) и синонимия.

Очевидно, что термины, определения и основные понятия, используемые в стандартах, должны удовлетворять приведенным требованиям. Таким образом, безупречность терминов, определений и основных понятий, по мнению автора, сводится к следующему:

1) все термины, определения и основные понятия, приведенные в стандарте, должны быть однозначными и непротиворечивыми;

2) все термины, определения и основные понятия, приведенные в стандарте, должны быть согласованы с другими государственными стандартами и не вступать в противоречие с более ранними стандартами.

Это означает, что государственный стандарт **не должен содержать**:

1) разных терминов, определений и основных понятий с одинаковым содержанием и смыслом (не должен содержать синонимов);

2) одного и того же термина, определения и основного понятия с разным содержанием и смыслом (не должен содержать омонимов);

3) терминов, ранее принятых в других государственных стандартах, с новым, измененным содержанием.

В тех случаях, когда имеют место указанные отклонения и несоответствия, стандарт должен содержать необходимые пояснения и обоснования.

В соответствии со стандартами [2] и [3] оценка показателя надежности – это числовое значение показателя надежности, вычисленное на основе выборочных данных, а оценивание показателя надежности – как операция получения (вычисления) числовых значений показателя надежности на основе выборочных данных. Таким образом, оценка показателя надежности (или какого-то другого параметра) является случайной величиной, которая может принимать различные значения от выборки к выборке. Оценивание производится на основе статистических методов с целью получения оценки показателя надежности (или параметра).

С этих позиций термины «оценка безотказности», «оценка дерева», «оценка вентиля», «оценка надежности» относятся к свойствам, схемам, устройствам и имеют особый смысл, который следует уточнить.

В приложении А.1.12 стандарта [4] в разделе «Статистические методы оценки вероятности безотказной работы» правильно использованы термины «оценка вероятности безотказной работы», «оценка показателей безотказности», «оценка показателя надежности». Однако наряду с этим термин «оценка» используется без связи со статистикой: «оценка показателей надежности» (4.1), «оценка улучшения надежности» (4.1), «оценка характеристик событий» (4.4.1).

В большинстве стандартов в разделе «Термины и определения» понятие «определение» использовано корректно: в этом разделе действительно приведены определения терминов.

Однако в других случаях понятие «определение» использовано в смысле, который отличен от [12], то есть никакие определения в указанном смысле не приведены.

Следует отметить, что в некоторых стандартах термины «оценка» и «определение» использованы совместно. Совместное использование этих терминов с трудом укладывается в понимание.

Смысл и содержание некоторых терминов были рассмотрены в [10]. Здесь автор опирается на термины, обоснованные в [10] и приведенные в табл. 1.

Табл. 1. Термины, обоснованные в [10]

Термины, используемые в стандартах	Термины, предложенные в [10]
1. Оценка надежности	Расчет надежности
2. Метод оценки надежности; метод определения надежности	Метод расчета надежности
3. Расчетный метод определения надежности	Вероятностный метод расчета надежности
4. Экспериментальный метод определения надежности	Статистический метод расчета надежности

Результаты

Таким образом, опираясь на требования к безупречности терминов и на исследованные термины в [10], автор предложил формулировки терминов вместо тех терминов, в которых использованы «оценка» и «определение». Эти формулировки приведены в табл. 2 и 3.

Определения терминов в табл. 1 приведены в [10]. Формулировки терминов в табл. 2 и 3 настолько очевидны, что не нуждаются в определении.

Обсуждение и выводы

При использовании терминов «оценка» и «определение» в некоторых стандартах нарушена их безупречность: не соблюдаются требования рекомендаций по стандартизации, не соблюдаются однозначность и согласованность с другими стандартами.

Табл. 2. Корректировка терминов, в которых использована «оценка»

Термин, используемый в стандарте	Предлагаемый термин
1. Оценка вероятности безотказной работы	Расчет (вычисление) вероятности безотказной работы
2. Оценка показателей надежности	Расчет (вычисление) показателей надежности
3. Показатели надежности оценивают на основе вероятностей	Показатели надежности рассчитывают на основе вероятностей
4. Оценка показателей эффективности и ремонтпригодности	Расчет (вычисление) показателей эффективности и ремонтпригодности
5. Оцениваемые показатели	Вычисляемые показатели
6. Оценка вероятностных характеристик	Расчет (вычисление) вероятностных характеристик
7. Оценки на основе диаграммы состояний и переходов	Расчеты на основе диаграммы состояний и переходов (с использованием диаграммы состояний и переходов)

Табл. 3. Корректировка терминов, в которых использовано «определение»

Термин, используемый в стандарте	Предлагаемый термин
1. Определение коэффициента готовности	Расчет (вычисление) коэффициента готовности
2. Определение метода	Обоснование (выбор) метода
3. Определить среднюю продолжительность состояний	Рассчитать (вычислить) среднюю продолжительность состояний
4. Определить частоту состояния	Рассчитать (вычислить) частоту состояния
5. Выражение для определения средней наработки	Выражение (формула) для расчета средней наработки
6. Формулы для определения показателей надежности	Формулы для расчета (вычисления) показателей надежности
7. Формулы для определения интенсивности отказов	Формулы для расчета (вычисления) интенсивности отказов
8. Определение вероятностей ...	Расчет (вычисление) вероятностей ...

Следует отметить, что вслед за государственными стандартами эти термины используются в технической документации, в научных статьях, монографиях и учебниках.

Предложенные здесь варианты терминов следует рассматривать как предварительное предложение. Окончательные варианты терминов должны быть выработаны путем широкого обсуждения и принятия компромиссного решения.

Библиографический список

- ГОСТ Р 27.302-2009. Надежность в технике. Анализ дерева неисправностей. М.: Стандартинформ, 2012. IV, 22 с.
- ГОСТ Р ИСО 3534-1-2019. Статистические методы. Словарь и условные обозначения. Часть 1. Общие статистические термины и термины, используемые в теории вероятностей. М.: Стандартинформ, 2020. IV, 65 с.
- ГОСТ Р 50779.10-2000. Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2005. IV, 41 с.
- ГОСТ Р 51901.5-2005. Менеджмент риска. Руководство по применению методов анализа надежности. М.: Стандартинформ, 2005. IV, 43 с.
- ГОСТ Р 51901.12-2007. Менеджмент риска. Методы анализа видов и последствий отказа. М.: Стандартинформ, 2008. IV, 35 с.
- ГОСТ Р 51901.13-2005. Менеджмент риска. Анализ дерева неисправностей. М.: Стандартинформ, 2005. IV, 10 с.
- ГОСТ Р 51901.14-2007. Менеджмент риска. Структурная схема надежности и булевы методы. М.: Стандартинформ, 2008. IV, 23 с.
- ГОСТ Р 51901.15-2005. Менеджмент риска. Применение марковских методов. М.: Стандартинформ, 2005. IV, 15 с.
- ГОСТ Р МЭК 61165-2019. Надежность в технике. Применение марковских методов. М.: Стандартинформ, 2019. IV, 26 с.
- Зеленцов Б.П. Предложения по совершенствованию терминологии в области надежности // Надежность. 2021. Т. 21. № 2. С. 28-30.
- Похабов Ю.П. О дефиниции термина «надежность» // Надежность. 2017. Т. 17. № 1. С. 4-10.
- Рекомендации по стандартизации Р 50.1.075-2011. Разработка стандартов на термины и определения. М.: Стандартинформ, 2012. III, 19 с.

Сведения об авторе

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

Вклад автора в статью

Автор провел терминологический анализ стандартов по применению терминов «оценка» и «определение», в результате чего были выявлены термины, нуждающиеся в уточнении.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Стегоанализ методов скрытия информации в графических контейнерах

Ярослав Л. Грачев^{1*}, Валентина Г. Сидоренко^{1, 2}

¹Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация, ²Высшая школа экономики, Москва, Российская Федерация

*yaroslav446@mail.ru



Ярослав Л. Грачев



Валентина Г. Сидоренко

Резюме. Цель. На сегодняшний день остро стоит вопрос защиты от атак на информационные системы, использующие методы стеганографии. Эти атаки опасны использованием самых обычных файлов данных – в особенности, файлов графических форматов – в качестве контейнеров для доставки в систему вредоносного кода или утечки чувствительной информации. Вопросами разработки методов обнаружения такой скрытой информации занимается специальный подраздел стеганографии – стегоанализ, а сами эти методы должны активно использоваться как компьютерными криминалистами при расследовании инцидентов безопасности, так и автоматизированными системами защиты с интегрированными модулями анализа файлов данных на предмет наличия в них вредоносной или опасной информации. Важной особенностью таких работ является необходимость исследования самых различных элементов и форм представления файлов-контейнеров. В частности, необходима проверка не только непосредственно значений цветов пикселей в изображениях, но и частотных характеристик последнего. При этом возникает ряд важных вопросов, связанных с наилучшими практиками применения алгоритмов стегоанализа и составлением корректных выводов по результатам их работы. Целью работы является краткий анализ наиболее важных и актуальных методов стегоанализа как пространственных, так и частотных, а также формирование выводов об их работе и способах анализа предоставляемых ими результатов на основе проведения тестирования программного комплекса, реализующего данные методы. **Методы.** Для стегоанализа скрытия, произведенного в наименее значащие биты пикселей изображения, используется метод Хи-квадрат, опирающийся на статистический способ анализа при помощи критерия Пирсона, а также метод Regular-Singular, использующий сигнатурный анализ групп пикселей и средства аналитической геометрии для формирования оценки относительного объема скрытого сообщения. Для обнаружения встраивания информации, произведенного в представлении изображения в частотной области, используется метод стегоанализа Коха-Жао, позволяющий также установить значения параметров, необходимых для извлечения скрытого сообщения. **Результаты.** Создан программный комплекс, объединяющий в себе программные реализации проанализированных методов. Проведен ряд тестовых испытаний данного комплекса для оценки результатов работы рассмотренных методов. Для проведения тестирования была составлена выборка изображений различных форматов, в которых различными способами произведено встраивание информации. Результаты анализа файлов выборки использованы для формирования выводов об эффективности проанализированных методов и интерпретации результатов их работы. **Заключение.** На основе полученных результатов тестирования сформулированы выводы о точности работы методов стегоанализа при различных объемах встроеного сообщения и методах его скрытия. Выявленные на основе анализа результатов закономерности позволили сформулировать ряд правил получения из результатов анализа выводов об установлении факта обнаружения скрытой информации и оценке ее объема.

Ключевые слова: стегоанализ, метод Хи-квадрат, RS-метод, метод Коха-Жао, стегоконтейнер.

Для цитирования: Грачев Я.Л., Сидоренко В.Г. Стегоанализ методов скрытия информации в графических контейнерах // Надежность. 2021. №3. С. 39-46. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-3-39-46>

Поступила 12.02.2021 г. / **После доработки** 16.07.2021 г. / **К печати** 17.09.2021 г.

Введение

Файлы и данные графических форматов на сегодняшний день занимают значительную долю сетевого трафика и встречаются повсеместно – не только в виде изображений, размещенных на различных сетевых ресурсах, но и в виде элементов графических интерфейсов и дизайнерских решений, составных элементов более сложных форматов данных и многих других формах.

Одновременно в последние годы показывает заметный рост доля вредоносного программного обеспечения, использующего в атаках на информационные системы методы стеганографии, то есть методы скрытия факта передачи некоего тайного сообщения [1]. Как правило, такие атаки в качестве контейнеров для доставки потенциально опасных данных используют именно файлы изображений – в виду возможности скрытия в них больших объемов данных без внесения заметных человеческому глазу искажений.

Стегоанализ представляет собой один из разделов стеганографии, изучающий способы выявления тайно передаваемой информации в анализируемом информационном объекте. Под тайно передаваемой информацией обычно подразумевается информация, скрытая теми или иными стеганографическими методами. Нередко также стегоанализ изучает способы и возможности извлечения скрытой информации при ее детектировании в условиях отсутствия необходимых для этого входных данных [2].

Несмотря на огромное разнообразие алгоритмов скрытия факта передачи информации в графических файлах, почти все они сводятся к нескольким базовым методам стеганографии. К их числу относятся метод скрытия в наименьших значащих битах пикселей, а также метод Коха-Жао, кодирующий информацию в представлении изображения в частотной области [2, 3]. Большинство остальных стеганографических методов являются модификациями или вариациями данных двух.

Для обнаружения информации, скрытой вышеописанными способами, разработан ряд методов стегоанализа, программная реализация которых позволяет автоматизировать процесс анализа и проводить его без участия человека (в отличие от, например, разного рода визуальных атак).

1. Методы стегоанализа

1.1. Метод Хи-квадрат

Метод атаки на стегосистему с помощью анализа критерия Хи-квадрат был предложен и описан Андреасом Вестфелдом и Андреасом Пфитцманом в 1999 году. Данный способ ориентирован на обнаружение информации, скрытой методом наименьших значащих бит (НЗБ).

Первым делом вводится понятие пар значений – «PoV» (pair of values). Каждая пара значений – это пара байт, кодирующих интенсивности цветов и отличаю-

щихся лишь на один наименьший значащий бит. Метод НЗБ, фактически, производит преобразования в рамках данных пар, меняя, если это требуется, значение байта с оригинального на «смежное» в его PoV, другое значение той же пары [4].

Идея данного метода анализа основывается на предположении, что в незаполненном контейнере вероятность одновременного появления обоих значений каждой пары мала – а, следовательно, значительно разнится количество значений интенсивностей цветов таких, которые отличаются на наименьший значащий бит [4]. Иначе говоря, для незаполненного контейнера разница количества появлений двух значений одной пары значительна – и так для всех PoV. Количество появлений каждого значения также называется частотой.

В качестве теоретически ожидаемого распределения выбирается последовательность средних арифметических значений частот всех пар. Поскольку при скрытии в НЗБ происходит лишь перераспределение частот внутри пары, то сумма частот пары остается неизменной – и, следовательно, постоянным остается значение среднего арифметического частот внутри PoV.

Под наблюдаемой выборкой подразумевается последовательность, состоящая только из четных или только из нечетных значений всех PoV, что обусловлено необходимостью дальнейшего сравнения распределения этих выборок с теоретически предсказанным распределением в рамках расчетов критерия Хи-квадрат. В этой связи имеет значение исключительно разница между средним значением частот пары и любой из наблюдаемых в этой паре частотой.

Таким образом, теоретически ожидаемая последовательность значений, составленная из средних по паре, является таковой и для незаполненного, и для заполненного контейнеров. Степень сходства распределения наблюдаемой выборки с теоретически ожидаемым распределением, таким образом, становится мерой вероятности того, что произошло стеганографическое встраивание в контейнер. Если оценка по критерию Хи-квадрат позволяет сделать вывод о том, что отклонения от теоретически ожидаемого распределения незначительны, это означает, что с высокой вероятностью имело место встраивание информации.

Данный метод стегоанализа является более эффективным, если применять его алгоритм не целиком к изображению, а к его частям. Чаще всего изображение разбивается либо на блоки, составляющие примерно 1% от площади всего изображения, либо на условные строки матрицы пикселей. Последний способ позволяет увидеть приблизительные начало и конец последовательно встроеного сообщения.

Хотя наименьшие визуально заметные искажения вносят изменения пикселей синего цветового канала, использование методов скрытия в НЗБ позволяет задействовать все три канала сразу в виду низкой детектируемости человеческим глазом изменений цвета при инверсии младших бит пикселя [5]. В этой связи имеет

смысл подсчет среднего значения вероятности наличия скрытой информации по всем трем цветовым каналам одного анализируемого блока изображения. Даже если скрытие производилось лишь в одном канале, средняя вероятность будет заметно отлична от стремящейся к нулю и позволит сделать вывод о встраивании в данный блок пикселей тайной информации.

1.2. RS-метод

Метод обнаружения стеганографически скрытых сообщений Regular-Singular был предложен Андреасом Пфитцманом, Джессикой Фридрих и Мирославом Гольяном в 2001 году. Метод основывается на анализе непересекающихся групп из n смежных пикселей, n – четное [6]. После выделения групп вводится функция регулярности – функция, которая сопоставляет одной группе одно действительное число и показывает регулярность пикселей группы. Значение функции регулярности должно быть тем больше, чем более шумной является группа пикселей.

В качестве функции регулярности выбирается сумма абсолютных разностей (сумма перепадов значений) соседних пикселей группы:

$$f(G) = f(g_1, g_2, \dots, g_n) = \sum_{i=1}^{n-1} |g_{i+1} - g_i| \quad (1)$$

где G – группа пикселей; g_i – i -й элемент группы пикселей G ; n – количество пикселей в группе.

После подсчета значений функции регулярности для всех групп анализируемого изображения определяется группа функций переворота («функций флиппинга»). Эти функции соответствуют следующему набору свойств:

- 1) $\forall x \in P : F(F(x)) = x$, $P = \{0, 255\}$;
- 2) $F_{\text{пр}} : 0 \leftrightarrow 1, 2 \leftrightarrow 3, \dots, 254 \leftrightarrow 255$;
- 3) $F_{\text{обр}} : -1 \leftrightarrow 0, 1 \leftrightarrow 2, \dots, 255 \leftrightarrow 256$.

Группа функций переворота F состоит из прямой $F_{\text{пр}}$, обратной $F_{\text{обр}}$ и нулевой F_0 .

Применение функций переворота эмулирует добавление обратимого шума, усиливая всплески значений в группе и уменьшая ее регулярность [2].

Для применения данных функций (также называемого «флиппингом») к значениям пикселей группы вводится маска, описывающая группу функций флиппинга, применяемых к группе пикселей. Маска – это группа из n значений, каждое из которых выбирается из числа трех: -1 , 0 или 1 . Каждое из них кодирует одну из трех функций переворота: значение « -1 » соответствует $F_{\text{обр}}$, « 0 » – F_0 , « 1 » – $F_{\text{пр}}$. К пикселю группы при проведении флиппинга, таким образом, применяется соответствующая ему закодированная в маске функция переворота.

После применения функций переворота к группе производится сравнение значений функции регулярности со значениями до флиппинга. На основе данного сравнения группа относится к одному из классов: обычные (*regular*), необычные (*singular*), непригодные (*unusable*):

- если $f(F(G)) > f(G)$, то $f \in R$ (группа обычная);
- если $f(F(G)) < f(G)$, то $f \in S$ (группа необычная);
- если $f(F(G)) = f(G)$, то $f \in U$ (группа непригодная).

Для каждой группы флиппинг производится два раза: с прямой и с инвертированной маской. После проведения операций классификации для всех групп выполняется подсчет ряда количественных характеристик:

- количество обычных групп для маски M : R_M ;
- количество необычных групп для маски M : S_M ;
- количество обычных групп для инверсной маски $\neg M$: $R_{\neg M}$;
- количество необычных групп для инверсной маски $\neg M$: $S_{\neg M}$.

Все описанные характеристики задаются как относительные величины, то есть в процентах от общего числа групп k . Таким образом, $R_M + S_M \leq 1$ и $R_{\neg M} + S_{\neg M} \leq 1$. Основной гипотезой данного метода является предположение о том, что в незаполненном контейнере количества групп одного класса для обычной и инверсной маски равны: $R_M \cong R_{\neg M}$ и $S_M \cong S_{\neg M}$.

На рис. 1 представлен типичный вид так называемой RS-диаграммы – графиков значений R_M , S_M , $R_{\neg M}$ и $S_{\neg M}$ в зависимости от количества пикселей с инвертированными НЗБ в изображении [6]. Под p на рисунке 1 и далее подразумевается процент заполнения стегоконтейнера скрытым сообщением (относительная длина сообщения). На оси абсцисс отмеряется процент пикселей с инвертированными НЗБ, на оси ординат – процент групп обычных и необычных классов прямой и инвертированной масок (от общего числа групп).

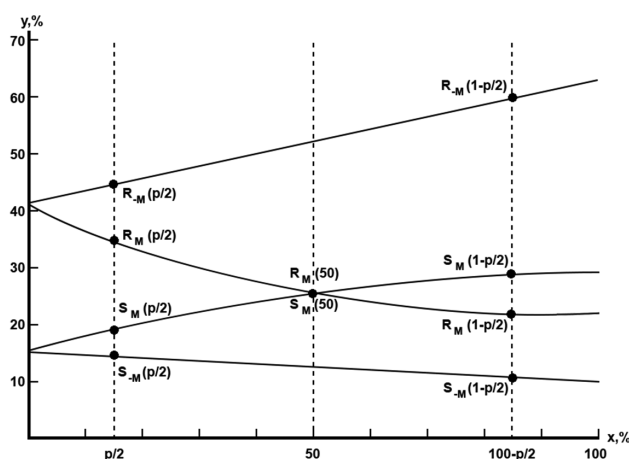


Рис 1. RS-диаграмма

На основе информации о данном типичном поведении графиков количественных характеристик групп производятся дальнейшие вычисления, позволяющие оценить относительную длину скрытого сообщения.

Если относительная длина скрытого сообщения равна p , то, так как p является случайным битовым потоком, в среднем в изображении инвертируется $p/2$ НЗБ. В таком случае, 100%-я заполненность стегоконтейнера ведет к тому, что $p/2=50\%$. Инверсия половины НЗБ означает,

что разница между количеством обычных и необычных групп сведется к нулю. Тогда $R_M \equiv S_M$, что отражено RS-диаграмме.

Измерения численных характеристик групп соответствуют точкам RS-диаграммы $R_M(p/2)$, $S_M(p/2)$, $R_{-M}(p/2)$ и $S_{-M}(p/2)$. Вычисленные численные характеристики групп для того же изображения после инвертирования всех его НЗБ будут соответствовать точкам $R_M(1-p/2)$, $S_M(1-p/2)$, $R_{-M}(1-p/2)$ и $S_{-M}(1-p/2)$.

Далее RS-метод предлагает аппроксимацию кривых, проходящих через точки $R_{-M}(p/2)$, $R_M(1-p/2)$ и $S_{-M}(p/2)$, $S_M(1-p/2)$ соответственно, прямыми линиями. Кривые, проходящие через точки $S_M(p/2)$, $S_M(1-p/2)$ и $R_M(p/2)$, $R_M(1-p/2)$, аппроксимируются квадратичными параболой с учетом наличия точек пересечения прямых и парабол: соответствующие одной маске парабола и прямая имеют точку пересечения на оси ординат RS-диаграммы, а параболы, как сказано выше, пересекаются при $p/2=50\%$.

Для оценки относительной длины сообщения p надо решить систему 11 уравнений с 11 неизвестными: по два коэффициента для каждой из двух прямых, по три коэффициента для каждой из двух парабол и значение p . Система включает в себя 8 уравнений прямых или парабол для 8 найденных ранее точек, 2 уравнения точек пересечений парабол с соответствующими прямыми и уравнение для точки пересечения парабол. Решение системы позволяет найти значение p [6].

Ключевая особенность RS-метода состоит в том, что он анализирует количественные характеристики небольших групп пикселей. В связи с чем он, хотя и не способен детектировать область потенциального встраивания, может обнаружить скрытие, произведенное в случайные биты, а не последовательно.

1.3. Стегоанализ метода Коха-Жао

Данный вид анализа предназначен для детектирования встраивания в изображение-контейнер сообщения по методу Коха-Жао. Этот метод ищет информацию, закодированную в частотном представлении изображения.

Представление изображения в частотной области формируется путем вычисления коэффициентов дискретного косинусного преобразования (ДКП), для чего изображение разбивается на блоки размером 8×8 пикселей, после чего над каждым блоком производится двумерное ДКП, в результате чего формируется матрица из 64-х коэффициентов [7].

В полученной матрице коэффициент в левом верхнем углу, соответствующий нулевой частоте (элемент матрицы с индексами $(0; 0)$), называется DC-коэффициентом. Он определяет основной цветовой оттенок (среднюю интенсивность цвета) всего блока. Все остальные полученные коэффициенты называются AC-коэффициентами и выражают частоту изменения интенсивности цвета по разным направлениям выбранного блока (по горизонтали и вертикали) [8].

Таким образом, каждая матрица коэффициентов ДКП делится на три подмножества: низкочастотные, среднечастотные и высокочастотные (от левого верхнего к правому нижнему углу матрицы).

Низкочастотные коэффициенты имеют большее влияние на интенсивность цвета пикселей. В связи с этим любые изменения и преобразования над коэффициентами ДКП производятся в средне- или высокочастотных областях.

Одной из важнейших задач, требующих решения при попытке детектировать встраивание методом Коха-Жао, является получение верного вывода о том, за счет каких коэффициентов ДКП происходило встраивание. Поскольку применение метода Коха-Жао предполагает скрытие информации в одном наборов среднечастотных компонент, основные операции анализа выполняются для каждого из таких наборов отдельно [9].

Так как кодирование бит скрываемого сообщения осуществляется за счет разницы абсолютных значений выбранных коэффициентов, сперва следует вычислить абсолютные значения данных разниц для всех блоков изображения:

$$C_i = ||D_i(k1, k2)| - |D_i(k2, k1)||, \quad (2)$$

где $D_i(x, y)$ – значение коэффициента ДКП с индексами (x, y) в i -м блоке.

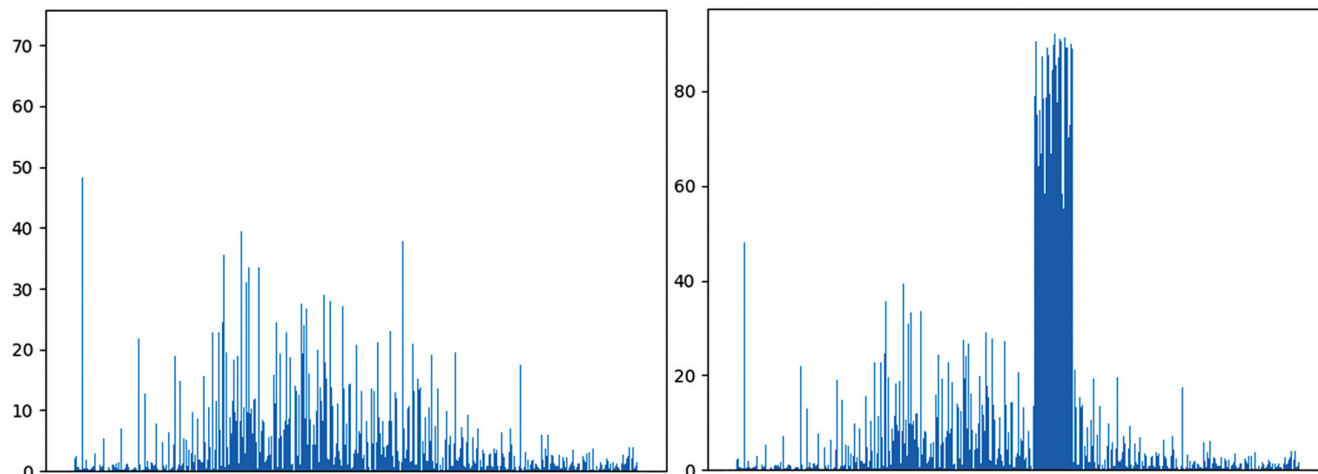


Рис. 2 – Гистограммы значений C_i пустого и заполненного контейнера

На данном этапе вычисляется не просто разность абсолютных значений коэффициентов, а их абсолютные значения – это связано с тем, что кодирование бит определяется преодолением порогового значения P для нуля и $-P$ – для единицы [9].

Несмотря на возможность появления флуктуаций в виде различной величины пиковых значений C_i в блоках, которые не использовались для кодирования бит скрытого сообщения, реально использованные для встраивания блоки отличает сравнительно длинный непрерывный последовательный участок пиковых значений.

На рис. 2 представлены гистограммы значений C_i для одного и того же пустого и заполненного контейнера соответственно. По оси абсцисс расположены индексы блоков, по оси ординат – значения C_i соответствующих блоков.

Как видно, гистограммы зависимости значения C_i от номера блока для пустого и заполненного контейнеров будут отличаться наличием на последнем ступенчатого участка.

Для получения границ области встраивания составляется последовательность модулей разниц значений гистограммы, где два наибольших значения должны соответствовать границам области встраивания.

Однако при больших размерах изображения детектирование скрытого сообщения малого размера (а также, в особенности, закодированное с малым значением порога) может быть значительно затруднено за счет «случайных» пиковых значений последовательности C_i . Это может происходить за счет использования графических форматов, допускающих сжатие, за счет различий в точности вычисления ДКП на кодирующем и анализирующем устройствах, а также за счет возможных искажений и потерь при передаче изображений.

Для того, чтобы уменьшить вероятность сбоев работы алгоритма определения области встраивания из-за подобного «шума», следует произвести предварительный анализ гистограммы с учетом того факта, что встроенное сообщение соответствует непрерывному участку пиковых значений – то есть найти наиболее длинный такой участок.

Таким образом, вывод о наличии встроенного сообщения может быть сделан, а также определены границы скрытого сообщения в значениях индексов блоков. Для вычисления порогового значения кодирования следует найти минимальное из значений C_i в детектированной области встраивания. По данному значению можно произвести извлечение информации.

Описанные процедуры анализа должны быть проведены для каждой из предполагаемых пар коэффициентов ДКП. Как правило, это следующие наборы пар коэффициентов: (3;4) и (4;3), (3;5) и (5;3), а также (4;5) и (5;4) [8]. Из полученных результатов следует выбирать тот, что соответствует наибольшему из обнаруженных значений порога кодирования P .

2. Результаты тестирования эффективности методов

Тестирование вышеописанных методов стегоанализа производилось при помощи разработанного авторами программного комплекса, в рамках которого были реализованы все три алгоритма обнаружения.

В рамках тестирования был проведен анализ выборки из 1600 файлов изображений, в которых одним из трех способов (последовательная вариация метода НЗБ, псевдослучайная вариация метода НЗБ, метод Коха-Жао) был скрыт один из девяти подготовленных текстовых файлов либо информация не скрывалась в принципе.

Для каждого файла выборки анализ производился при помощи всех трех реализованных методов: методом Хи-квадрат, RS и методом стегоанализа скрытия, произведенного по Коха-Жао. Результаты работы методов, представляющие собой относительную (для первых двух) или абсолютную (для последнего) предполагаемую длину скрытого в изображении сообщения, были сравнены с реальными объемами скрытого в каждом контейнере сообщения.

Под средним отклонением подразумевается среднее арифметическое значение модулей разниц между детектированным относительным объемом скрытого изображения и реальным относительным объемом. Средние отклонения методов Хи-квадрат и RS представлены в табл. 1.

Табл. 1. Средние отклонения методов Хи-квадрат и RS

Название метода	Для пустых контейнеров, %	Последовательный НЗБ, %	Псевдослучайный НЗБ, %
Хи-квадрат	0,105	1,411	22,225
RS	4,055	22,996	4,403

Как видно, метод Хи-квадрат практически не имеет ложных срабатываний на пустых контейнерах, а RS-метод показывает для них в среднем крайне низкий уровень заполненности – около 4%.

При этом видно, что метод Хи-квадрат показывает неплохую точность при обнаружении последовательного встраивания в наименее значащие биты (ошибка оценки размера сообщения в среднем составляет всего лишь около 1,4%), а при псевдослучайном встраивании ошибается на объем, составляющий чуть меньше четверти размера контейнера – то есть, в лучшем случае, позволяет лишь обнаружить или заподозрить факт встраивания.

Метод Regular-Singular показывает противоположные результаты, с неплохой точностью определяя псевдослучайное скрытие и крайне плохо оценивая размер последовательно скрытых сообщений.

Для уточнения данных об эффективности оценки размера скрытого сообщения методами Хи-квадрат и

RS были подсчитаны значения средних отклонений для различных степеней относительной заполненности контейнера. Эти значения приведены в табл. 2 и табл. 3.

Табл. 2. Средние отклонения при различных степенях заполненности для метода Хи-квадрат

Степень заполненности	Среднее отклонение при последовательном НЗБ, %	Среднее отклонение при псевдослучайном НЗБ, %
100%	0,609	0,000
90% – 100%	2,107	26,665
80% – 90%	3,678	61,536
70% – 80%	2,851	69,184
60% – 70%	5,013	54,700
50% – 60%	3,248	52,638
40% – 50%	1,783	44,272
30% – 40%	1,761	35,669
20% – 30%	1,635	24,164
10% – 20%	1,019	13,543
0% – 10%	0,366	5,384

Табл. 3. Средние отклонения при различных степенях заполненности для метода RS

Степень заполненности	Среднее отклонение при последовательном НЗБ, %	Среднее отклонение при псевдослучайном НЗБ, %
100%	70,501	11,593
90% – 100%	67,184	8,060
80% – 90%	57,385	4,112
70% – 80%	50,704	1,806
60% – 70%	40,795	1,638
50% – 60%	29,291	1,264
40% – 50%	21,286	2,977
30% – 40%	11,476	2,985
20% – 30%	6,277	2,166
10% – 20%	5,254	3,832
0% – 10%	3,894	3,722

Исходя из представленных результатов, можно выделить несколько закономерностей. Точность определения размера сообщения, скрытого последовательным способом, довольно высока для метода Хи-квадрат при любых объемах скрытого сообщения. Наибольшее отклонение – около 5% – метод показывает на контейнерах, заполненных на 60-70%.

В то же время метод Хи-квадрат способен с крайне высокой точностью определять размер скрытого псевдослучайно сообщения, если он составляет 100% объема контейнера. При заполненности менее 100%, но более 90% данный метод позволяет однозначно идентифицировать встраивание, но ошибка в оценке

размера сообщения значительна. При степени заполненности менее 90% метод Хи-квадрат не всегда способен в принципе детектировать скрытие – его среднее отклонение в некоторых случаях примерно эквивалентно относительной длине сообщения. При заполненности ниже 60% метод Хи-квадрат показывает наихудшие результаты при псевдослучайном скрытии, а при заполненности от 60% до 90% способен определить встраивание, но с огромными ошибками в оценке размера сообщения.

Метод RS показывает неплохую точность при обнаружении псевдослучайного встраивания. Однако если степень заполненности менее 10%, он не всегда способен обнаруживать скрытие (величина среднего отклонения около 3,7%, а отклонение для пустых контейнеров составляет около 4,4%). При заполненности от 20% до 80% метод показывает хорошую точность (менее 3% среднего отклонения). Если размер псевдослучайно скрытого сообщения более 80%, RS-метод ошибается уже заметно сильнее – тем больше, чем больше объем встраиваемой информации. Более высокую величину ошибки метод показывает при заполненности в 10-20%.

При оценке размера последовательно скрытого сообщения метод RS показывает куда худшие результаты и имеет среднее отклонение тем выше, чем выше степень заполненности. При этом отклонение при объеме сообщения менее 10% не позволяет в большинстве случаев однозначно идентифицировать факт скрытия (аналогично псевдослучайно скрытой информации и с учетом среднего отклонения для пустых контейнеров).

При степени заполненности более 10% метод RS будет оценивать размер скрытого сообщения в среднем примерно в 15-30% объема контейнера, позволяя сделать однозначный вывод о факте встраивания, но крайне неточно определяя его объем.

Для оценки результатов работы алгоритма стегоанализа скрытия, произведенного по методу Коха-Жао, было определено количество корректно распознанных изображений, для которых алгоритм правильно оценил размер скрытого сообщения, некорректно распознанных, для которых алгоритм вернул неправильное, но отличное от нуля значение размера сообщения, и нераспознанных, для которых алгоритм вернул 0 в то время, как в изображении действительно скрыта информация.

Вышеописанные характеристики представлены в табл. 4.

Табл. 4. Характеристики различных видов результата анализа скрытия по Коха-Жао

Вид результата	Количество	Относительное количество
Корректно распознаны	277	92,3%
Некорректно распознаны	19	6,3%
Не распознаны	4	1,3%

Все пустые контейнеры были корректно идентифицированы методом Коха-Жао как изображения, не содержащие скрытой информации.

Как видно из таблицы, более, чем в 90% случаев алгоритм смог корректно определить размер встроенного сообщения, а значит, с большой долей вероятности, его можно извлечь. В наибольшем числе остальных случаев размер оценен неправильно, что не позволяет извлечь скрытые данные (по крайней мере, без ручного вмешательства), однако позволяет сделать однозначный вывод о наличии скрытия в частотной области. Не распознанными вовсе остались 1,3% изображений, что может говорить о низком выбранном пороге встраивания в них информации или их высокой зашумленности, вызывающей всплески значений разниц коэффициентов матрицы ДКП, осложняющие идентификацию области встраивания.

Анализ результатов тестирования также показал, что ни в одном из случаев стегоанализ Коха-Жао не выявил скрытие в пространственной области изображения (в наименьших значащих битах), а методы Хи-квадрат и RS не могли показать результат, позволяющий установить факт встраивания в представление изображения в частотной области.

3. Выводы по использованию методов для стегоанализа

Исходя из результатов, представленных выше, для получения однозначного вывода о наличии встраивания информации в младшие биты пикселей требуется проводить анализ и методом Хи-квадрат, и методом RS. Сравнение результатов работы обоих методов позволяет, чаще всего, установить вид встраивания – последовательное или псевдослучайное, а также получить более-менее точную оценку размера сообщения.

Если оценка по Хи-квадрат меньше 0,1%, а по RS – меньше 4%, то встраивание отсутствует и контейнер пуст.

Если оценка по Хи-квадрат близка к 100% – контейнер действительно полон или почти полон. Если оценка по RS при этом составляет около 30% или меньше – информация встроена последовательно, если около 80% и более – псевдослучайно.

Если оценка по RS составляет более 30%, а оценка по Хи-квадрат – не более 30%, то обнаружено псевдослучайное встраивание. Если результат по RS при этом составляет менее 80%, то его можно считать почти точной оценкой размера скрытого сообщения. В противном случае достоверно можно считать, что объем скрытой информации превышает 80%.

Если же оценка RS-методом составляет менее 30%, то ее следует сравнить с оценкой метода Хи-квадрат. Если последняя в разы меньше или близка к нулю, то обнаружено псевдослучайное встраивание с размером сообщения, соответствующим оценке RS-метода. Однако если результат анализа по Хи-квадрат примерно

равен оценке RS-метода или превышает ее, то обнаружено последовательное скрытие информации – и, соответственно, размером скрытых данных следует считать оценку размера, предоставленную методом Хи-квадрат.

Использование вышеописанных правил сравнения и анализа результатов в приведенной последовательности позволяет покрыть подавляющее большинство сочетаний результатов методов Хи-квадрат и RS. Получение результатов, не описанных данными правилами, говорит о возникновении флуктуаций, которые могут являться последствиями самых различных факторов (высокая зашумленность изображения, крайне малые его размеры или другие) и требует ручного вмешательства специалиста для формирования окончательного вывода.

Графическое представление полученных выводов представлено на рис. 3. Под p подразумевается финальная оценка размера скрытого сообщения. Синим цветом обозначены области, соответствующие псевдослучайному встраиванию (0.2, 0.4, 0.5, 0.7). Зеленым цветом обозначены области, соответствующие последовательному встраиванию (0.3, 0.6). Серым цветом обозначены области значений критериев, требующие дополнительного исследования. Область белого цвета (0.1) соответствует пустому контейнеру.

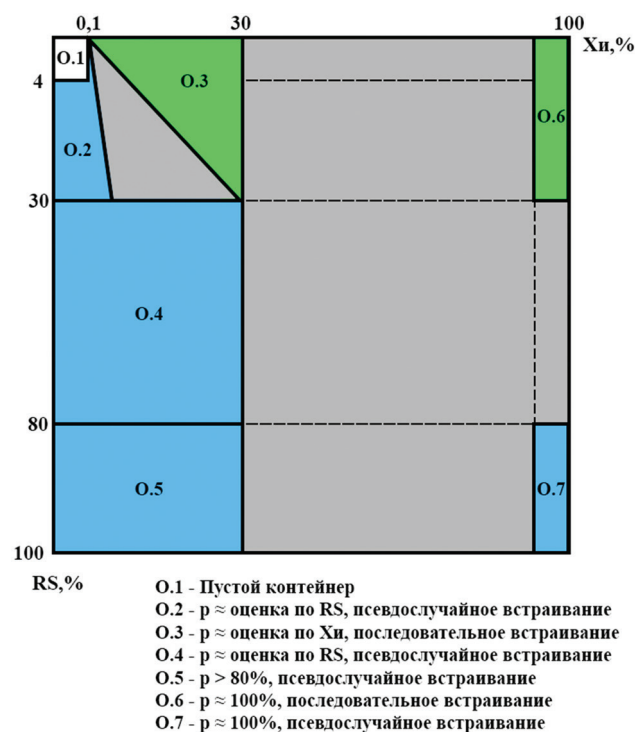


Рис. 3. Графическое представление выводов

Реализованный метод стегоанализа в частотной области позволяет обнаруживать скрытие, произведенное по методу Коха-Жао, в подавляющем большинстве случаев, однако размер скрытого сообщения может быть в ряде ситуаций определен неверно. Следовательно, в некоторых случаях для извлечения скрытой в частотной области информации может потребоваться ручное вме-

шательство в виде анализа специалистом гистограмм разниц коэффициентов ДКП.

Таким образом, данные правила и выводы могут быть использованы в комплексных системах защиты или отдельных модулях анализа изображений, в автоматическом режиме обнаруживая потенциально опасные графические файлы, которые могут нести в себе встроенный вредоносный код или чувствительные данные.

Заключение

Проведенный анализ методов стегоанализа позволил выполнить их программную реализацию в рамках единого комплекса. Тестирование полученного комплекса на выборке из 1600 файлов изображений позволило оценить общую эффективность методов, их средние ошибки в оценке длины встроенных сообщений. Тестирование позволило выявить ряд закономерностей, зависимость результатов работы методов от объемов скрытых сообщений. Выявленные закономерности позволили сформировать по работе рассмотренных методов стегоанализа ряд выводов, позволяющих корректно оценивать получаемые оценки объемов скрытой информации и на их основе делать выводы.

Эти закономерности и выводы позволяют упростить работу компьютерных криминалистов, использующих данные методы стегоанализа при анализе изображений, а также могут служить критериями при исследовании графических файлов на наличие скрытой информации в автоматизированных системах защиты информации или их стегоаналитических модулях, направленных на предотвращение утечек информации по стеганографическим каналам или предупреждение атак, использующих методы стеганографии.

В рамках разработки программного комплекса была произведена адаптация проанализированных методов стегоанализа к современным графическим форматам файлов, использующих схему хранения цветов *TrueColor*. Помимо обнаружения скрытия в НЗБ, оценки области и примерного порога встраивания информации в представление изображения в частотной области, комплекс позволяет также в автоматическом режиме производить попытку извлечения информации даже в случаях с заметно зашумленными изображениями. Выводы о специфике работы рассмотренных методов стегоанализа, сформированные в виде правил сравнения результатов проведения совместного анализа, позволяют тонко настраивать критерии систем защиты или анализаторов трафика для предотвращения инцидентов информационной безопасности.

Библиографический список

1. Варновский Н.П., Голубев Е.А., Логачев О.А. Современные направления стеганографии // Материалы

конференции «Математика и безопасность информационных технологий» в МГУ 28-29 октября 2004 г. М.: МЦНМО, 2005. С. 32-64.

2. Аграновский А.В., Балакин А.В., Грибунин В.Г. и др. Стеганография, цифровые водяные знаки и стеганоанализ: Монография. М.: Вузовская книга, 2009. 217 с.

3. Конахович Г.Ф., Пузыренко А.Ю. Компьютерная стеганография. Теория и практика. Киев: «МК-Пресс», 2006. 286 с.

4. Westfeld A., Pfitzmann A. Attacks on Steganographic Systems. Dresden University of Technology, Department of Computer Science. Dresden, Germany, 1999. DOI: 10.1007/10719724_5

5. Гонсалес Р.С., Вудс Р.Е. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. 1105 с.

6. Fridrich J., Goljan M., Du R. Reliable Detection of LSB Steganography in Color and Grayscale Images. Binghamton University. New York, USA, 2001. DOI: 10.1145/1232454.1232466

7. Syed Ali Khayam. The Discrete Cosine Transform (DCT): Theory and Application. Department of Electrical & Computer Engineering, Michigan State University. Michigan, USA, 2003.

8. Farid H. Digital Image Forensics. Scientific American, 2008. 199 с.

9. Белим С.В., Вильховский Д.Э. Стегоанализ алгоритма Коха-Жао // Математические структуры и моделирование. 2018. № 4(48). С. 113–119. DOI: 10.25513/2222-8772.2018.4.113-119

Сведения об авторах

Ярослав Леонидович Грачев – обучающийся, Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация, e-mail: yaroslav446@mail.ru

Валентина Геннадьевна Сидоренко – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Управление и защита информации», Российский университет транспорта, профессор Департамента бизнес-информатики, Высшая школа бизнеса, Высшая школа экономики, Москва, Российская Федерация, e-mail: valenfalk@mail.ru

Вклад авторов в статью

Грачев Я.Л. Разработка программного комплекса, реализующего проанализированные методы стегоанализа, составление тестовой выборки, тестирование и анализ результатов, формирование выводов о работе протестированных методов.

Сидоренко В.Г. Анализ методов и принципов стеганографии, обзор методов стегоанализа.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Модель риска немецкого приложения для предупреждения Короны – перезагрузка

Йенс Брабанд¹, Хендрик Шебе^{2*}

¹Брауншвейгский Технический Университет, Брауншвейг, Германия, ²TÜV Rheinland, Кельн, Германия

*schaebe@de.tuv.com



Йенс Брабанд



Хендрик Шебе

Резюме. Цель. В этой статье мы обсуждаем модель риска немецкого приложения Corona Warning App в двух версиях. Обе модели основаны на таком общем полуколичественном подходе анализа рисков, который уже не является современным, а для некоторых областей применения даже не рекомендуется. Основная проблема заключается в том, что оценки параметров часто представляют собой только порядковые шкалы или ранговые числа, для которых такие операции, как умножение или деление, не являются четко определенными. Как следствие, результаты могут привести к недооценке или переоценке соответствующего риска. **Методы.** Анализируются модели риска, реализованные в двух версиях данного приложения. Проводится сравнение номенклатуры параметров моделей, их влияния на результат, подходов к формированию комбинированной оценки риска. Анализируется эффективность моделей. **Результаты.** Показано, что большинство параметров в модели используется только в качестве бинарных индикаторных переменных. Выяснилось, что Corona Warning App использует гораздо более ограниченную модель, которая даже не оценивает риск, а полагается только на один параметр – взвешенное время экспозиции. Показано, что приложение сильно недооценивает даже этот параметр и поэтому может ошибочно успокаивать пользователей. Таким образом, можно сделать вывод, что базовая модель риска, реализованная до версии 1.7.1, является скорее дозиметрической моделью, зависящей от расчетной концентрации вируса и не зависящей от экспозиции и других параметров (за исключением некоторых пороговых значений). Это даже не модель риска в соответствии с определением многих стандартов. Изменения модели риска в более поздней версии не являются фундаментальными. В частности, более поздняя модель также оценивает не индивидуальный риск, а индивидуальное воздействие, как показывают единицы измерения результата. Кроме того, модель сильно недооценивает продолжительность воздействия. Хотя сообщается, что около 60% пользователей приложения поделились положительными результатами тестов, абсолютное число опубликованных результатов составляет менее 10% от всех положительных результатов тестов. Поэтому с индивидуальной точки зрения приложение эффективно только в 10% случаев, а то и меньше. **Заключение.** Поскольку Corona Warning App имеет и другие систематические ограничения и недостатки, рекомендуется не полагаться на ее результаты, а проводить тестирование COVID или вакцинацию. Кроме того, если в ближайшем будущем появится достаточное количество тестов вируса, приложение даже устареет. Скорее будет полезной разработка приложения, которое может оценивать риски априори, как своего рода поддержка принятия решений для своих пользователей на основе их индивидуального профиля риска.

Ключевые слова: приложение для предупреждения Короны, модель риска, анализ модели

Для цитирования: Брабанд Й., Шебе Х. Модель риска немецкого приложения для предупреждения Короны – перезагрузка // Надежность. 2021. №3. С. 47-53. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-3-47-53>

Поступила 24.05.2021 г. / После доработки 25.07.2021 г. / К печати 17.09.2021 г.

Введение

В Германии было введено приложение для борьбы с пандемией COVID: Corona Warning App (CWA). CWA рассчитывает риск заражения людей в результате контактов. В предыдущей работе мы проанализировали принцип работы CWA, а также его модель риска [12]. Недавно, после некоторой критики, модель была изменена (начиная с версии 1.9 и выше). В данной работе мы изучаем изменения в модели риска и ее значимость в качестве индикатора индивидуального риска. Несмотря на то, что данное обсуждение касается только немецкого приложения, так называемый механизм уведомления об опасности (Exposure Notification Framework, ENF), на который опирается CWA, был введен компаниями Apple и Google в качестве части стандартного интерфейса, поэтому можно ожидать, что результаты могут быть обобщены [14].

Здесь мы представим, как работает CWA, затем кратко опишем прежнюю модель риска, опишем изменения. Наконец, мы сравним модели риска и оценим эффект от изменений.

Как работает приложение

Сначала дается упрощенный обзор для понимания модели риска. Более подробная информация приведена в [1, 2]. Гораздо более широкий взгляд на приложения для отслеживания контактов был опубликован недавно [14].

После того как пользователь установил приложение CWA, каждый день создается новый анонимный идентификатор. Примерно каждые пять минут окружающая среда сканируется на наличие сигналов Bluetooth, излучаемых другими мобильными телефонами. Такие данные, как ID, затухание сигнала, продолжительность и т.д. собираются и агрегируются за каждый день.

Если пользователь получает положительный результат теста и соглашается его опубликовать, то связанные с ним анонимные идентификаторы за предыдущие 14 дней передаются на центральный сервер, откуда передаются всем абонентам и сверяются с записанными данными в локальном приложении. Фактическая оценка риска осуществляется децентрализованно каждым приложением CWA.

Базовая модель риска

Базовая модель до версии 1.7.1 определяется четырьмя параметрами [2], которые на первом этапе оцениваются по полуколичественной шкале с баллами от 0 до 8 за каждый день для каждого ID, сообщившего о положительном результате теста (рис. 1):

- дни с момента заражения (DE) – это время с момента контакта с инфицированным человеком, значение от 0 до 14; продолжительность более 14 дней не учитывается;
- продолжительность воздействия (ED) – это суммарное время воздействия в течение дня, величина принимает значения от 0 до 8;

- затухание сигнала Bluetooth (SA) – используется в качестве меры расстояния до зараженного человека, величина принимает значения от 0 до 8;

- риск передачи (TR) оценка уровня инфицированности человека в этот день, величина принимает значения от 0 до 8.

Затем оценивается общий балл риска (TRS) путем перемножения величин DE, ED, SA и TR. Теоретически баллы от 0 до 7168 возможны. ENF – это стандартный интерфейс для CWA, введенный Apple и Google, но параметры могут быть выбраны каждой реализацией, и поэтому они отличаются от страны к стране и от версии к версии приложения.

ENF напоминает подход, известный как приоритетное число риска (Risk Priority Numbers, RPN), и страдает от тех же ограничений и недостатков, которые известны уже около двух десятилетий [5, 6]. Для некоторых областей применения использование RPN даже не рекомендуется [7]. В целом такой подход больше не считается соответствующим уровню техники и должен использоваться только с большой осторожностью.

Основная проблема заключается в том, что оценки параметров часто представляют собой только порядковые шкалы или ранговые числа, для которых такие операции, как умножение или деление, не являются четко определенными. Как следствие, результаты могут привести к недооценке или переоценке соответствующего риска [8].

Однако в практической реализации CWA модель упрощается, а диапазоны совпадений ограничены [3]:

дни с момента контакта (DE) устанавливаются равными 5 для значений менее 14 дней и 0 для значений выше, что приводит к $\delta_{DE} = 5 \cdot I(DE \leq 14)$;

продолжительность экспозиции (ED) устанавливается равной 0 для всех значений до 10 минут, и 1 для значений выше, что дает $\delta_{ED} = I(ED > 10)$;

затухание сигнала (SA) устанавливается на 0 для значений выше 73 дБ и на 2 для всех значений ниже, т.е. $\delta_{SA} = 2 \cdot I(SA \leq 73 \text{ дБ})$;

риск передачи (TR) устанавливается на (6, 8, 8, 8, 8, 5, 3, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1) [4], в зависимости от DE, например, TR равен 6, если DE=1, 8, если DE=2 и т.д., и 0, если DE=14 или выше.

Здесь $I(x)$ обозначает индикаторную функцию, которая принимает значение 1, если выражение в скобках истинно, и ноль в противном случае.

Таким образом, большинство параметров используется только в качестве бинарных индикаторных переменных, и в текущей конфигурации суммарная оценка риска для конкретного дня и конкретного ID дается следующим образом

$$TRS = 10 \cdot \delta_{ED} \cdot \delta_{SA} \cdot \delta_{DE} TR. \quad (1)$$

Так, в реализации [3] до версии 1.7.1 существует только шесть возможных оценок: 0, 10, 30, 50, 60, 80. Но также определена минимальная оценка риска

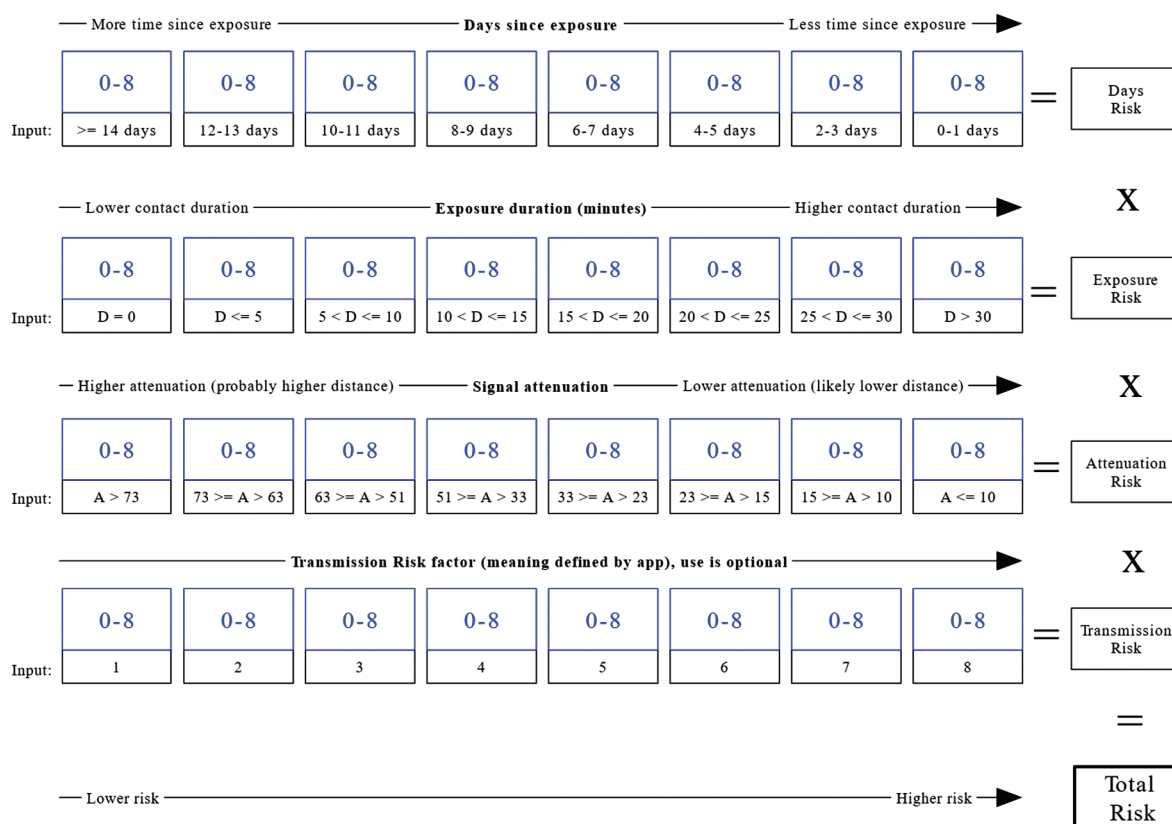


Рис. 1. Базовая модель риска [2]

(MRS), равная 11, и все риски ниже этой отметки отбрасываются. Однако параметризация CWA может быть изменена.

Таким образом, можно сделать вывод, что базовая модель риска, реализованная до версии 1.7.1, является скорее дозиметрической моделью, зависящей от расчетной концентрации вируса и не зависящей от экспозиции и других параметров (за исключением некоторых пороговых значений). Это даже не модель риска в соот-

ветствии с определением многих стандартов. Более того, модель риска была сильно дискретизирована.

Пример:

Алиса получает положительный результат теста 20 числа месяца, о чем немедленно сообщает.

Боб часто ездит на одном автобусе с Алисой. Поездка занимает 10 минут, и он встречал ее 16-го (две поездки) и 9-го (одна поездка) числа. Они сели вместе на расстоянии около 1 м.

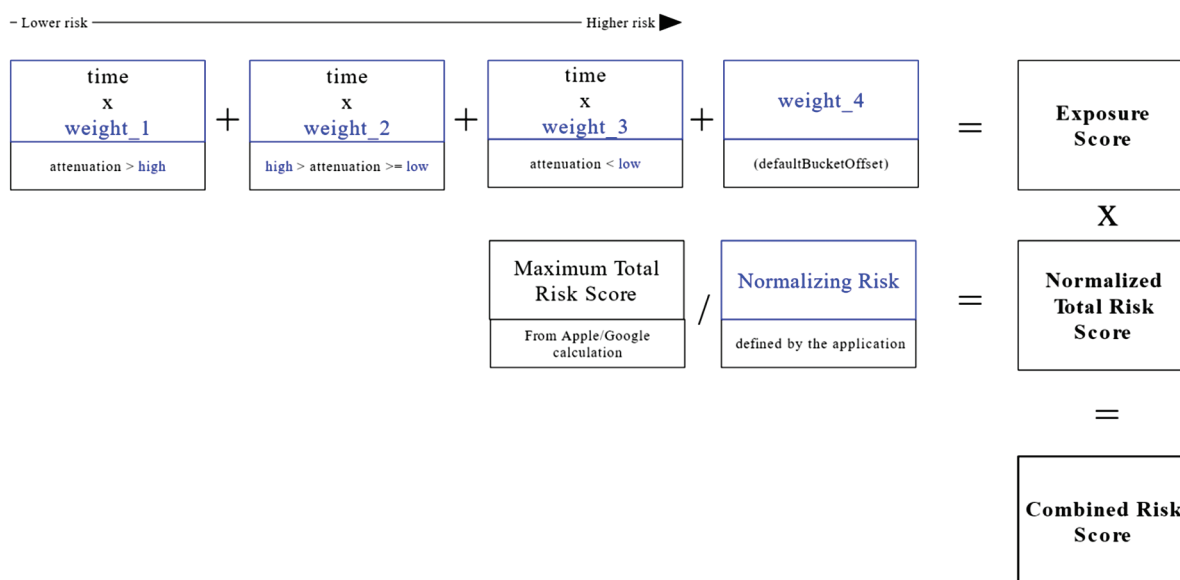


Рис. 2. Расчет комбинированного риска [2]

Для 16-го числа $DE = 4$, поэтому $TR = 8$. Оба SA и ED выше порога и установлены на 2 и 1, соответственно, поэтому $TRS = 80$.

Для 9-го числа $DE = 11$ и поэтому $TR = 1$. Однако ED ниже порога и установлен на 0. Поэтому $TRS = 0$. В противном случае TRS был бы равен 5, что ниже MRS, и был бы отброшен в любом случае.

Модель комбинированного риска

На втором этапе каждое приложение CWA объединяет баллы для различных встреч, рассчитанные по базовой модели риска. Пусть $R_1, R_2, \dots, R_n$ обозначают индивидуальные значения TRS для разных дней и разных идентификаторов, которые выше MRS.

На первом этапе определяется максимальное значение $R_{\max}$ из различных TRS. Затем значения ED всех n встреч суммируются в три различных класса: близкий, средний и дальний. Пусть эти длительности будут t_1, t_2 и t_3 . Для каждого из классов определяется вес и дополнительно смещение веса, которые обозначаются w_1, w_2, w_3 и w_4 соответственно. Обратите внимание, что на практике веса для близких и средних классов перевешивают остальные. Также определяется средний балл риска (ARS), который в настоящее время составляет 50 [3]. Затем рассчитывается общий комбинированный риск (TCR) (рис. 2):

$$TCR = (t_1 w_1 + t_2 w_2 + t_3 w_3 + w_4) \frac{R_{\max}}{ARS}. \quad (2)$$

Удивительно, но TCR на самом деле является не риском, а экспозицией, поскольку результат исчисляется минутами. Первый член (в скобках) – это взвешенное время экспозиции, которое корректируется относительным фактором (безразмерным), зависящим от максимальной концентрации вируса по сравнению с некоторым средним значением.

Таким образом, в целом, без полной математической точности, мы можем охарактеризовать подход, используемый до версии 1.7.1 [3] немецким предупреждающим приложением CWA, как

$$TCR = (t_1 w_1 + t_2 w_2 + t_3 w_3 + w_4) \cdot \frac{\max\{10 \cdot \delta_{ED} \cdot \delta_{DE} \delta_{SA} \cdot TR\}}{ARS} \approx (t_1 + t_2 / 2) \frac{10 \max\{TR\}}{ARS}. \quad (3)$$

По сути, это не риск в узком смысле, а взвешенная продолжительность воздействия. Единицы измерения TP – не ожидаемый ущерб за время или что-то подобное, а просто минуты воздействия. А применяемый вес – это просто мера относительной заразности, выражающая значение TP относительно нормирующего фактора 5, который принимается за среднюю заразность. И влияние этого фактора ограничено, максимально возможное значение – 1,6.

А если дополнительно учесть неопределенность и разброс всех входных параметров, например, шум в

ослаблении сигнала, неопределенность в длительности экспозиции и инфекционности [4], или произвольность выбранных весов, то модель сводится к довольно простой формуле и процедуре принятия решения:

$$TCR \approx \frac{\max TR}{5} \sum ED, \quad (4)$$

– оцените минуты, в течение которых человек находился в тесном контакте с инфицированными людьми ($\sum ED$);

– взвесьте экспозицию ED по инфицированности наиболее инфицированного человека (максимум TR/5);

– примите меры, если результат ВЫСОКИЙ.

Пример (продолжение):

• кроме того, Чарли получил положительный результат теста 20 числа, но сообщил о нем только 21 числа. Но он установил приложение только неделю назад;

• он ехал в том же автобусе в те же дни, но с несколько большим расстоянием до Боба (2 м);

• для 16-го числа $DE = 5$ (оценивается 21-го числа), поэтому $TR = 5$. SA и ED выше порога и установлены на 2 и 1 соответственно, поэтому $TRS = 50$;

• для 9-го числа Чарли еще не установил приложение, поэтому данных нет;

• поскольку Алиса сидела близко к Бобу, а Чарли – на среднем расстоянии, $t_1 = t_2 = 20$ минут. В настоящее время веса установлены [3] как $w_1 = 1, w_2 = 0,5, w_3 = w_4 = 0$, и поэтому взвешенная сумма дает время 30 минут;

• таким образом, TCR составляет $30 \times 80 / 50$, что дает 48 минут;

• предупреждения приложения выдаются на основе TCR, они настроены [3] как НИЗКИЙ для значений до 15 и ВЫСОКИЙ, для значений выше 15. Таким образом, в итоге Боб получит предупреждение о высоком риске.

Обратите внимание, что TCR практически не зависит от расстояния, измеряемого по затуханию сигнала Bluetooth. Определен лишь нечеткий порог, а продолжительность воздействия взвешивается по двум классам расстояния. Однако известно, см. например, FAQ от RKI [9], что передача инфекции происходит в основном через аэрозоли, и риск увеличивается при уменьшении расстояния воздействия. Известно, что тесный контакт с инфицированными лицами также является фактором сверхраспространения. Важность расстояния подтверждается и тем, что оно является основным фактором в немецких правилах защиты от коронарной болезни АНА, где первая буква обозначает Abstand (расстояние).

Новая версия модели риска

Начиная с версии 1.9 модель риска была несколько раз изменена [10] с основным намерением улучшить гранулярность оценки риска, а также накопление риска, т.е. несколько встреч с низким риском в прежней модели могут представлять высокий риск в новой модели. В качестве оговорки следует отметить, что некоторые параметры, похоже, адаптировались несколько раз, и

даже в репозитории GitHub [11] параметры в документации не совпадают. Информация, представленная здесь, относится к концу марта 2021 года, и в сомнительных случаях авторы использовали параметры непосредственно из конфигурационных файлов репозитория, а не из документации.

В качестве основного средства достижения этой цели введены 30-минутные окна оценки, и контакт засчитывается только в том случае, если в течение этого окна

1) затухание сигнала (SA) ниже порогового значения 73 дБ в течение по крайней мере 5 минут (ED), и

2) уровень риска передачи (TR) должен быть не менее 3 (сравните с рис. 1)

Если эти критерии не выполняются, то контакт отбрасывается. По сравнению с формулой (1) это не кажется большим изменением, за исключением второго условия, которого раньше не было.

Ближние столкновения с SA ниже 55 дБ будут засчитаны полностью, в то время как все остальные столкновения будут уменьшены на 50%. Обратите внимание, что это не совпадает с интерфейсом, определенным на рис. 1, но используемые веса те же, что и раньше, сравните с формулой (2).

Для уровня TP вводится новый весовой коэффициент в диапазоне от 0,6 до 1,6 (рис. 3). Это кажется сокращением по сравнению с расчетами по формуле (2). Большинство факторов те же, что и раньше, например, для TR = 8, 6, 5, 3, но некоторые были отброшены или слегка изменены.

Transmission Risk Level (TRL) to Value (TRV)	
I	0.0
II	0.0
III	0.6
IV	0.8
V	1.0
VI	1.2
VII	1.4
VIII	1.6

Рис. 3. Прямое отображение TRL на масштабный коэффициент [11].

Наконец, измеренное время встречи (более 5 минут в течение 30-минутного окна) взвешивается по их близости, умножается на вес уровня TP (из рис. 3) и суммируется для конкретного дня. Если сумма меньше 15 минут, но больше 5 минут (некоторые источники предлагают 13 минут [11]), то общий риск является

НИЗКИМ или ЗЕЛЕНЫМ, в противном случае – ВЫСОКИМ или КРАСНЫМ. Этот показатель оценивается за день, и приложение отображает количество дней с низким или высоким риском вместо количества встреч с низким или высоким риском (согласно версии 1.7.1).

Принимая все это во внимание, кажется, что общая полук количественная структура ENF, определенная на рис. 1, больше не применяется. Вместо этого для каждой встречи i конкретного дня оценивается балл риска передачи, аналогичный (1) (с некоторыми изменениями в функциях индикаторов):

$$TRS_i = \delta_{ED} \cdot \delta_{SA} \cdot ED \cdot TR, \quad (5)$$

где ED уже понимается как взвешенное время встречи, аналогично (2)

$$ED = t_1 w_1 + t_2 w_2 + t_3 w_3 + w_4. \quad (6)$$

Наконец, риск объединяется по дням путем простого суммирования

$$TCR = \sum_{per\ day} TRS_i. \quad (7)$$

Пример (новая версия модели):

- для встречи с Алисой 16-го числа DE = 4 и поэтому первоначально TR = 8, который по рис. 3 затем перекодируется в TR = 1,6. Оба показателя SA и ED выше порога, вес равен 1, и оба времени считаются полными, соответственно, поэтому обе встречи оцениваются TRS = 16 минут, по отдельности. Суммируя их, Бобу выводится предупреждение красного цвета о высоком риске в этот день;

- для 9-го числа DE = 11 и поэтому TR = 1, который перекодируется в TR = 0. Таким образом, для этого риска TRS = 0, даже если другие пороговые значения выполнены. В противном случае при самом низком TR = 0,6 TRS был бы равен 6, что было бы, по крайней мере, предупреждением зеленого цвета с НИЗКИМ риском для этого дня;

- обратите внимание, что предупреждение красного цвета не зависит от встречи с Чарли 16 числа. В этот день параметры Чарли были DE = 5, а TR = 5 перекодирован в TR = 1. Поскольку расстояние было больше, ED уменьшается вдвое до 5, поэтому обе встречи оцениваются TRS = 5, что в сумме составляет 10 баллов за день, что в отдельности привело бы к предупреждению зеленого цвета, а в сочетании с оценками Элис дало бы 26 баллов.

Если учесть, что некоторые масштабные коэффициенты были опущены по сравнению с предыдущим подходом, например, для DE и SA, то результаты в примере вполне сопоставимы. Наиболее очевидные различия заключаются в том, что

- термин, связанный с $\max\{TR\}$ в формулах (3) и (4), был упрощен и заменен фиксированным коэффициентом, основанным на TR, как показано на рис. 3, и

- что риски накапливаются и сообщаются за день, а не объединяются для всех встреч, как в формуле (4).

Обсуждение

Изменения в модели риска не являются фундаментальными, поэтому общая критика из [12] остается в силе. В частности, CWA оценивает не индивидуальный риск, а индивидуальное воздействие, как показывают уже единицы измерения результирующего TCR, которое является минимальным [min], а не ожидаемым вредом, или ожидаемой тяжестью последствий, или аналогичными выражениями риска.

Кроме того, CWA сильно недооценивает продолжительность воздействия по следующим причинам:

- к настоящему времени было загружено около 25 миллионов приложений CWA [13], но неизвестно, сколько из них являются активными. Если оптимистично предположить, что 30% населения будут иметь активное приложение, то менее 10% встреч могут быть зарегистрированы, так как обеим сторонам необходимо, чтобы приложение было активировано. Исследования показывают [14], что с 60% охвата населения системой CWA, она может стать эффективным инструментом;

- хотя сообщается, что около 60% пользователей приложения поделились положительными результатами тестов [13], абсолютное число около 250 000 опубликованных результатов составляет менее 10% от всех положительных результатов тестов (около 2 820 000);

- большое количество коротких контактов (менее 5 минут), которые могли бы быть близкими и заразными, не обнаруживаются и не регистрируются приложением по причинам экономии энергии приложение сканирует окружающую среду только примерно каждые 5 минут.

Это верно и с точки зрения отдельного пользователя: пользователь с активной CWA встречает других пользователей с активной CWA менее чем в 30% случаев, многие короткие встречи, например, в супермаркете или на работе, будут отброшены, и только в 60% возможных случаев другие зараженные пользователи сообщат о своих положительных результатах. Таким образом, с индивидуальной точки зрения CWA эффективен только в 10% случаев, а то и меньше.

Хорошее, плохое и уродливое – или резюме

Модель риска немецкого приложения CWA имеет несколько интересных, несколько загадочных, а также тревожных свойств:

1) она увеличила число пользователей и совместима с приложениями из некоторых соседних стран, но ее охват все еще довольно ограничен;

2) основное преимущество заключается в том, что CWA автоматически регистрирует контакты, которые в противном случае, возможно, не были бы замечены пользователем. Но из-за конфиденциальности данных пользователь не может извлечь уроки из предупреждения, так как не сообщается, когда и как долго длилось

воздействие. Поэтому CWA также не может поддерживать отслеживание контактов;

3) кроме того, количество зарегистрированных положительных тестов составляет лишь небольшой процент от всех положительных тестов;

4) в узком определении многих стандартов, это не полная модель риска, так как она оценивает только отдельные параметры риска, но не комплексный риск, а скорее своего рода мера воздействия. Частичное объяснение может быть основано на децентрализованной архитектуре приложения и неполной и неточной информации, которую оно использует;

5) что еще хуже, она не охватывает многие ситуации с коротким воздействием, которые все же могут сопровождаться высокой дозой передачи вируса. Это может быть связано с давлением со стороны мобильной индустрии, направленным на экономию энергии;

6) кроме того, это не априорная оценка риска, чтобы решить, приемлемо ли то или иное действие, она оценивает риск только апостериори, когда его уже нельзя уменьшить;

7) и, наконец, самое главное, она недооценивает истинное время воздействия или дозу вируса в значительной степени, возможно, от 5 до 10 раз, поэтому она успокаивает своих пользователей, чтобы они чувствовали себя в безопасности, заявляя об отсутствии или низком риске, но в действительности воздействие может быть намного выше.

Подводя итог, авторы рекомендуют не полагаться на результаты CWA из-за многочисленных недостатков его подхода и модели риска, некоторые из которых носят систематический характер и не могут быть улучшены дальнейшими обновлениями. Всегда следует отдавать предпочтение тестам или, еще лучше, вакцинации. Кроме того, похоже, что в ближайшем будущем, когда появится достаточное количество тестов вируса Corona, CWA даже устареет. Скорее рекомендуется разработать приложение, которое может оценивать риски априори, как своего рода поддержка принятия решений для своих пользователей на основе их индивидуального профиля риска.

Библиографический список

1. RKI: So funktioniert die Corona-Warn-App im Detail. URL: https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/WarnApp/Funktion_Detail.pdf (дата обращения: 06.10.2020).
2. Команда CWA: Corona-Warn-App Solution Architecture. URL: https://github.com/corona-warn-app/cwa-documentation/blob/master/solution_architecture.md (дата обращения: 06.10.2020).
3. CWA Team: Wie ermittelt die Corona-Warn-App ein erhöhtes Risiko? URL: <https://github.com/corona-warn-app/cwa-documentation/blob/master/translations/cwa-risk-assessment.de.md> (дата обращения: 06.10.2020).
4. CWA Team: Эпидемиологическая мотивация уровня риска передачи, 2020-06-15. URL: <https://github.com/corona-warn-app/cwa-documentation/blob/master/translations/cwa-risk-assessment.de.md>

com/corona-warn-app/cwa-documentation/blob/master/transmission_risk.pdf (дата обращения: 06.10.2020).

5. Bowles J. An Assessment of RPN Prioritization in a Failure Modes Effects and Criticality Analysis. // Proc. RAMS2003. Tampa, January 2003.

6. Braband J. Improving the Risk Priority Number Concept // Journal of System Safety. 2003. № 3. P. 21–23.

7. Durivage M. Is It Time To Say Goodbye To FMEA Risk Priority Number (RPN) Scores? // Pharmaceutical Online. URL: <https://www.pharmaceuticalonline.com/doc/is-it-time-to-say-goodbye-to-fmea-risk-priority-number-rpn-scores-00012020-04-27> (дата обращения: 06.10.2020).

8. Braband J. Beschränktes Risiko // Qualität und Zuverlässigkeit. 2008. № 53(2). P. 28–33.

9. Robert-Koch-Institut: SARS-Cov-2 Steckbrief. URL: https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/Steckbrief.html (дата обращения: 06.10.2020).

10. SAP Deutschland: Risikoberechnung der Corona-Warn-App nach detaillierten Tests weiter angepasst, 23.02.2021. URL: <https://www.coronawarn.app/de/blog/2021-02-23-corona-warn-app-risk-calculation-optimization/> (дата обращения: 06.10.2020).

11. URL: <https://github.com/corona-warn-app> (дата обращения: 06.10.2020).

12. Braband J., Schäbe H. Analysis of the Risk Model of German Corona Warning App // Reliability: Theory & Applications. 2021. № 1(61). Vol. 16. P. 62-70.

13. Robert-Koch-Institut: Kennzahlen der Corona-

Warn-App, 17.02.2021. URL: https://www.rki.de/DE/Content/InfAZ/N/Neuartiges_Coronavirus/WarnApp/Archiv_Kennzahlen/Kennzahlen_18022021.pdf?__blob=publicationFile (дата обращения: 30.03.2020).

14. Landau S. People Count – Contact Tracing Apps and Public Health. The MIT Press, 2021.

Сведения об авторах

Йенс Брабанд – доктор естествознания, главный эксперт по RAMSS в Siemens Mobility GmbH, профессор Брауншвейгского технического университета, Брауншвейг, Германия, e-mail: j.braband@tu-braunschweig.de

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

Вклад авторов в статью

Вклад авторов заключается в анализе систем ИИ как статистических моделей, а также подхода к оценке безопасности и рассмотрении примера. Анализ проведен **Брабандом Й.**, **Шебе Х.** оказал помощь при анализе и при рассмотрении о применении приложения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Интеллектуальные методы повышения точности прогнозирования редких опасных событий на железнодорожном транспорте

Ольга Б. Проневич¹, Михаил В. Зайцев¹

¹АО «НИИАС», Москва, Российская Федерация

*obpronevich@gmail.com



Ольга Б. Проневич



Михаил В. Зайцев

Резюме. Цель статьи – рассмотреть подходы к методам повышения качества прогнозирования и классификации несбалансированных данных и выбрать методы, позволяющие повысить точность классификации редких событий. При прогнозировании появления редких событий методами машинного обучения ученые сталкиваются с проблемой несоответствия качества обученных моделей их реальной способности правильно спрогнозировать появление редкого события. Предмет исследования в статье – обучение моделей при исходных несбалансированных данных. Объект исследования – информация об инцидентах и опасных событиях на объектах железнодорожного электроснабжения. Проблема несбалансированных данных выражается заметной диспропорцией между типами наблюдаемых событий – количествами представителей различных классов. **Методы.** При работе с несбалансированными данными, в зависимости от характера задачи, качества и объема исходных данных, применяют различные методы повышения качества моделей классификации и прогнозирования Data Science. Часть этих методов направлена на работу с признаками и параметрами моделей классификации. К ним относятся методы FAST, CFS, нечёткие классификаторы, GridSearchCV и другие. Другая группа методов ориентирована на формирование репрезентативных подмножеств из исходного массива данных – сэмплов. Методы сэмплинга данных позволяют исследовать влияние пропорции классов на качество машинного обучения. В частности, в рамках настоящей статьи подробно рассматривается метод NearMiss. **Результаты.** Проблема дисбаланса классов при анализе количества инцидентов на объектах железнодорожного транспорта существуют с 2015 года. Несмотря на снижение доли опасных событий на объектах железнодорожного электроснабжения в течении трех лет с 2018 года, не исключен рост количества таких событий. Статистика долей опасных событий на уровне месяца демонстрирует отсутствие тренда на снижение и наличие пиков. В таких условиях эффективным периодом наблюдений за количеством инцидентов и опасных событий является месяц. Визуализация соотношения классов показала отсутствие выраженной границы между представителями класса большинства (инцидентами) и класса меньшинства (опасные события). Исследовалось соотношение классов в двух и трех измерениях в натуральных величинах и с применением метода главных компонент. Такая «близость» классов является одной из причин ошибок прогноза. В рамках работы проведен анализ имеющегося исследовательского опыта повышения качества машинного обучения при работе с несбалансированными данными. Определены и уточнены используемые для описания степени дисбаланса классов термины. Изучены сильные и слабые стороны различных методов работы с такими данными, приведено описание сильных и слабых сторон 50 методов. Из методов работы с количеством представителей классов при решении задачи классификации (прогнозирования появления) редких опасных событий на железнодорожном транспорте выбран метод NearMiss. Указанный метод позволяет проводить эксперименты с пропорциями представителей классов и методами отбора представителей классов. По результатам серии экспериментов удалось добиться повышения точности классификации редких опасных событий от 0 до 70-90%.

Ключевые слова: машинное обучение, редкие события, дисбаланс классов, повышение точности прогнозирования, сэмплинг данных, балансировка классов.

Для цитирования: Проневич О.Б., Зайцев М.В. Интеллектуальные методы повышения точности прогнозирования редких опасных событий на железнодорожном транспорте // Надежность. 2021. №3. С. 54-64. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2021-21-3-54-64>

Поступила 05.07.2021 г. / После доработки 02.08.2021 г. / К печати 17.09.2021 г.

1. Актуальность проблемы повышения качества моделирования при прогнозировании редких событий на железнодорожном транспорте

При прогнозировании опасных событий исследователи сталкиваются с противоречивой проблемой: чем меньше событий, тем лучше для объекта наблюдения, и тем сложнее обучить модель необходимого качества. В настоящее время доля опасных событий из всех инцидентов с объектами железнодорожного электроснабжения (ЖЭс) не превышает 2% в год (рис. 1а).

Как видно из графика на рис. 1а, доля опасных событий с 2018 года падает, однако доступного периода наблюдения недостаточно для того, чтобы сделать выводы о стабильном снижении, а данные до 2018 года свидетельствуют о возможности роста количества отказов. Детализация статистики до уровня месяца (рис. 1б) показывает наличие пиков количества опасных событий. Отсутствие выраженной сезонности в данных не позволяет планировать периодические профилактические мероприятия для предотвращения появления опасных событий. Год, как период наблюдения, не является эффективным, т.к. состояние объектов железнодорожного транспорта за год эксплуатации сильно меняется и за-

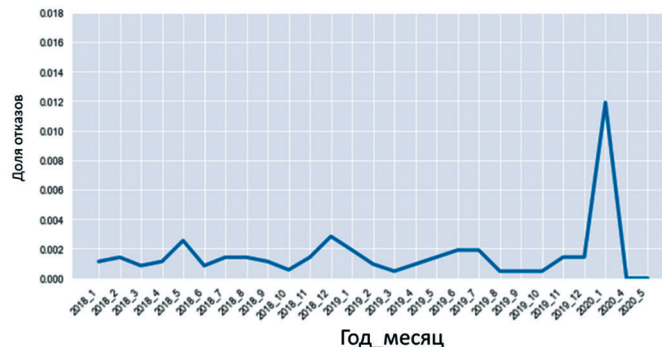
планируемые работы могут оказаться неактуальными. Поэтому особый интерес представляют модели, которые позволяют прогнозировать появление опасных событий по месяцам. На этом уровне детализации наблюдений вопрос «редкости» целевого фактора встает еще острее – в среднем на него приходится менее чем 0,4% случаев.

Несмотря на то, что количество опасных событий мало, количество не относящихся к ним инцидентов измеряется тысячами, что позволяет применять методы интеллектуального анализа больших данных. На пути построения высокоточных моделей существуют два основных препятствия: дисбаланс классов и качество данных. Когда говорят о качестве данных, обычно имеют в виду такие характеристики, как: неполнота, дублирование, несогласующиеся друг с другом сведения, ошибки при ручном вводе данных. Однако при работе с объектами железнодорожного транспорта авторы столкнулись с другой проблемой, а именно – слабыми отличиями между характеристиками объектов. Основная информация, характеризующая объекты ЖЭс на уровне месяца – данные об инцидентах. После подготовки данных каждый объект ЖЭс характеризуется более чем 150 признаками.

На рис. 2а показано соотношение классов на плоскости с двумя координатами: количество инцидентов и среднее количество дней на устранение инцидентов.

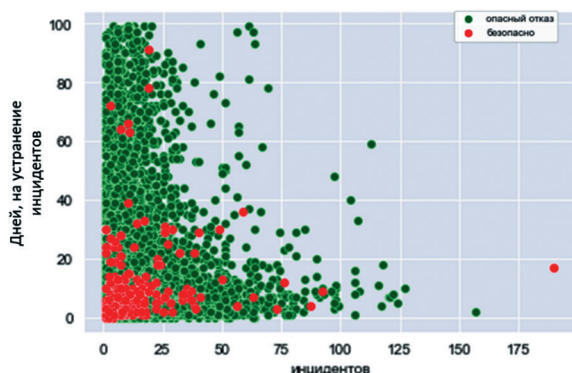


а) доля опасных событий по годам

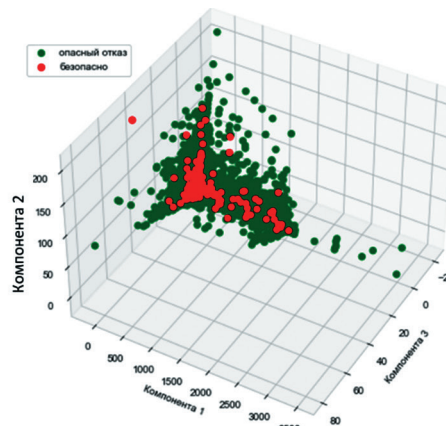


б) доля опасных событий по месяцам

Рис. 1. Доля опасных событий в инцидентах с объектами ЖЭс



а) Дисбаланс классов на плоскости



б) дисбаланс классов в 3-х измерениях

Рис. 2. Дисбаланс классов на объектах со схожими характеристиками

Видно, что для этих двух признаков нет границы между классами. Применив метод главных компонент для уменьшения размерности, перейдем от сотни признаков к трем (рис. 2б). На графике лучше видна концентрация опасных событий, однако по-прежнему нет выраженной границы между классами.

Таким образом, путь повышения качества классификации инцидентов должен включать в себя работу с дисбалансом классов и отбором признаков. Без работы по указанным направлениям качество моделей классификации состояния объектов ЖЭС не будет удовлетворительным. (табл. 1).

Табл. 1. Качество моделей классификации до применения методов повышения точности

Мо- дель	Точность прогноза опасного события		Точность прогноза безопасного состояния	
	Обучающая выборка	Тестовая выборка	Обучающая выборка	Тестовая выборка
GBC	0	0,416	1	1
Logi	0	0	1	1
KNN	0	0	1	1
DTC	0	0,043	0,994	1

2. Направления повышения точности предсказания появления редких событий

Методы повышения качества классификации можно разделить на две группы: работа с признаками и параметрами, а также работа с количеством представителей классов. Эти методы могут быть использованы как на этапе подготовки данных, так и на этапе обучения (рис. 3).

К группе методов работы с признаками относятся:

- 1) методы отбора значимых признаков;
- 2) выбор и настройка моделей.

Методы работы с количеством представителей классов:

- 1) уравнивание классов;
- 2) работа с дисбалансом классов;
- 3) моделирование на классе меньшинства;

4) подбор эффективной функции штрафов (работа с ошибкой классификации).

Несмотря на то, что методы в настоящее время широко известны, не существует единого алгоритма их комбинированного использования для повышения качества классификации. Специфика и объем данных, доступный при решении каждой конкретной задачи, вынуждает исследователей проводить эксперименты, в поисках оптимального сочетания различных методов. Так, например, в работе [1] предложена схема, состоящая из использования комбинации алгоритмов классификации и методов отбора признаков *RFE*, *Random Forest* и *Boruta*, с предварительным использованием балансирования классов методами случайного сэмпирования *SMOTE* и *ADASYN*. Эта работа показывает повышение точности классификации до 98% (с 93%). Однако исследование [2], посвященное классификации текстов, показывает, что эффективнее работать с изменением порога решений и весами ошибок разного рода, чем пытаться изменить распределение. При этом автор вводит разделение несбалансированных данных на умеренно несбалансированные данные (соотношение классов 7 к 1) и сильно несбалансированные данные (соотношение классов 14 к 1). В статье [2] продемонстрировано, что работа над пропорциями классов на сильно несбалансированных данных для некоторых моделей приводит к повышению точности классификации. При классификации обращений пользователей [3] определено, что применение методов балансирования классов может не только не дать результат, но и привести к снижению точности классификации. Вопреки исследованию [3], в статье [4] продемонстрирована эффективность применения методов сэмпинга данных.

Цель настоящей статьи – продемонстрировать на практике влияние методов работы с представителями классов на точность классификации опасных событий с объектами ЖЭС.

2.1. Обзор методов работы с дисбалансом классов.

Одним из основных методов работы с дисбалансом классов является метод *SMOTE*, алгоритм которого был разработан в начале 2002 г. [5]. В настоящее время су-

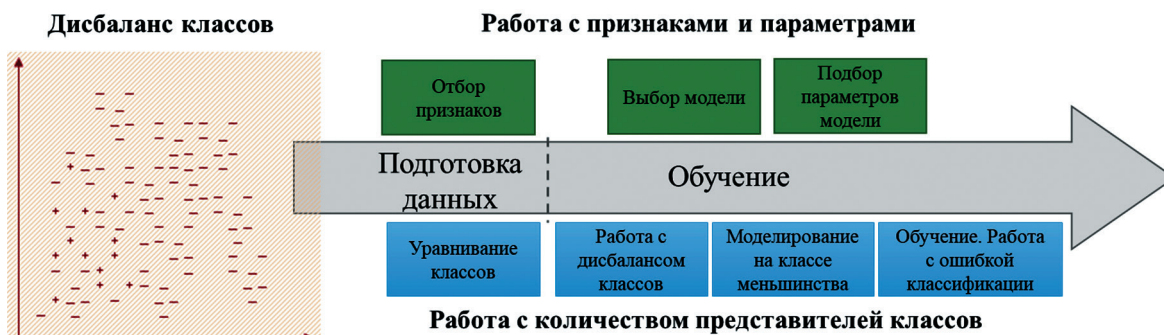


Рис. 3. Пути повышения качества классификации

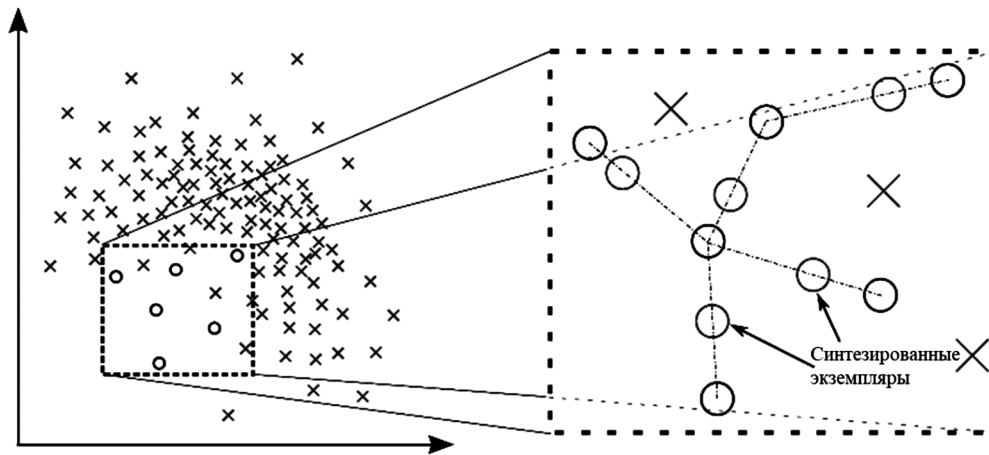


Рис. 4. Синтезирование наблюдения методом *SMOTE*



Рис. 5. Стратегии сэмплинга данных

существует ряд модификаций этого метода, также он стал вдохновением для создания других алгоритмов работы с несбалансированными данными. *SMOTE* возглавляет группу методов сэмпелирования данных – т.е. увеличения количества представителей класса меньшинства. Его суть показана на рис. 4.

Синтетические экземпляры генерируются в «пространстве функций», а не в «пространстве данных». Выборки класса меньшинства пополняются путем ввода синтетических примеров вдоль отрезков линии, соединяющих любого/всех ближайших соседей класса меньшинства k [5]. *SMOTE* относится к группе методов оверсэмплинга.

Другое направление работы с несбалансированными данными – уменьшение количества представителей класса большинства (андерсэмплинг или методы переиндексации).

Сочетание различных стратегий сэмплинга – гибридные методы, предусматривающие последовательное применение алгоритмов оверсэмплинга и андерсэмплинга. Визуализация процессов и результатов вышеупомянутых стратегий приведена на рис. 5.

В работе [6] проведен обзор методов работы с дисбалансами классов, информация о них, расширенная современными методами, приведена в табл. 2.

Исходя из преимуществ и недостатков методов, приведенных в табл. 2, а также опыта исследователей, изучающих методы сэмпелирования данных [51, 52, 53, 54], в качестве основного метода повышения качества классификации несбалансированных данных выбран метод *NearMiss* [47, 55]. Цель применения метода *NearMiss* – сбалансировать распределение наблюдений по классам меньшинства и большинства на основе оценки расстояния между экземплярами из разных классов.

Табл. 2. Обзор методов работы с дисбалансом классов

Решение	Суть группы методов	Сила	Слабость
Подход на уровне данных			
MLSMOTE [7]	Предварительный обучению этап: для балансировки используется либо недостаточная выборка, либо избыточная выборка, чтобы уменьшить коэффициент дисбаланса в обучающих данных	Прямой подход и широкое распространение использования	Риск переобучения
Диверсификация недостаточной выборки на основе стохастической чувствительности (DSUS) [8]			
ACO-отбор колоний муравьев [9]			
SMOTE [10]			
Эволюция недостаточной выборки [11]			
Бустинг стоимости (важности)			
Чувствительное к стоимости лингвистическое нечеткое правило [12]	Статьи затрат (обозначают важность идентификации классов) обозначают неравномерную важность идентификации среди классов. Повышение стратегии может намеренно смещать обучение в сторону классов, связанных с более высокой важностью идентификации и, в конечном итоге, улучшить производительность идентификации на них	Прямолинейный метод, особенно если известна цена ошибки	Дополнительные затраты на обучение в связи с поиском эффективной матрицы затрат, особенно когда реальная цена ошибки неизвестна
Повышение чувствительности к стоимости [13]			
Отбор признаков			
Выбор характеристик класса меньшинства	Методы отбора признаков, на которых проводится обучение	Помогает решить проблему перекрытия классов	Дополнительные вычислительные затраты из-за необходимости решать задачи предварительной обработки данных
Выбор объекта на основе плотности			
FAST генерация наблюдений на основе roc			
CFS генерация наблюдений на основе корреляций			
Подход на уровне алгоритмов			
Argument-based rule learning [14]	Специализированные алгоритмы, которые непосредственно изучают распределение дисбаланса классов из наборах данных	Эффективность за счет модифицированных алгоритмов для обучения исключительно из распределения классов дисбаланса	Может потребоваться решение задач предварительной обработки, чтобы сбалансировать неравномерное распределение классов
Обучение на основе различий [15]			
Нечеткий классификатор [16]			
z-SVM [17]			
Иерархическое нечеткое правило [18]			
Распределение условного ближайшего соседа класса [19]			
Примерное обобщение по k-NN [20]			
Взвешенный классификатор ближайшего соседа [21]			
Одноклассовое обучение			
Одноклассовое обучение [22]	Моделирование классификатора на представлении класса меньшинства	Простота применения	Неэффективен при применении с алгоритмами классификации, которые должны учиться на преобладающем классе
Распределение условного ближайшего соседа класса (CCND) [19]			
Экономичное обучение			
Байесовский классификатор SVM [23]	Группа методов классификации, основанная на стоимости ошибки классификации как ложного срабатывания, так и промаха	Простой и быстрый способ обработки	Неэффективен, если реальная стоимость недоступна. Вводятся дополнительные расходы, если требуется исследование стоимости, когда цена ошибки неизвестна
Чувствительное к стоимости обучение с SVM [24]			
Чувствительный к стоимости NN с PSO [25]			
SVM для адаптивно асимметричной ошибочной классификации стоимости [26]			

Решение	Суть группы методов	Сила	Слабость
Метод ансамблей			
<i>SMOTE</i> и ансамбль выбора функций [27]	Группа методов, основанных на применении нескольких классификаторов, обучающихся напрямую на данных, и суммирования их оценок для выработки окончательного решения по классификации	Разносторонние подходы	Сложность возрастает с использованием большего количества классификаторов. Трудно достичь концепции разнообразия
Ансамбли GA [28]			
Ансамбли для финансовых проблем [29]			
Бустинг в ансамбле <i>SVM</i> -методов [30]			
<i>RUSBoost</i> [31]			
<i>SMOTEBoost</i> [32]			
Гибридный подход			
FTM-SVM	Используется более одного алгоритма машинного обучения для улучшения качества классификации, часто за счет гибридизации с другими алгоритмами обучения для достижения лучших результатов. Гибридизация применяется с целью облегчить проблему выборки, выбора подмножества признаков, оптимизации матрицы затрат и точной настройки классических алгоритмов обучения	Набирает популярность в классификации классового дисбаланса. Обучение симбиозу посредством комбинации с другими алгоритмами обучения	Требуется тщательная оценка проекта, чтобы учесть различия между применяемыми методами
Обучение на основе <i>F</i> -меры [33]			
Лингвистическое нечеткое правило [34]			
Электронный алгоритм нечеткого классификатора [35]			
Извлечение нечетких правил с помощью <i>GA</i> [36]			
Нейро-нечеткость [37]			
Медицинские данные нейросети [38]			
Нейронные сети с <i>SMOTE</i> [39]			
Классификатор <i>kNN</i> для медицинских данных [40]			
<i>NN</i> обучена с <i>BP</i> и <i>PSO</i> для медицинских данных [41]			
Ядра дерева зависимостей [42]			
Использование чувствительности к стоимости в дереве [43]			
Недодискретизация и <i>GA</i> для <i>SVM</i> [44]			
Другие методы			
<i>ADASYN</i> [45, 46]	После создания выборки он добавляет случайные небольшие значения к точкам. Другими словами, вместо того, чтобы вся выборка линейно коррелировала с родителем, в них немного больше различий	Адаптивный характер: количество синтетических наблюдений основывается на соотношении наблюдений большинства и меньшинства. <i>ADASYN</i> делает больший акцент на более сложных областях данных	Недостатком <i>ADASYN</i> является то, что на него легко влияют выбросы
<i>NearMiss</i> [45, 47]	Случайное исключение примеров классов большинства. Когда экземпляры двух разных классов находятся очень близко друг к другу, мы удаляем экземпляры класса большинства, чтобы увеличить пространство между двумя классами. Это помогает в процессе классификации	Может уменьшить перекрытие выборок между различными классами	При недостаточной выборке количество недостаточных выборок невозможно контролировать, а массовые выборки, которые можно исключить, ограничены. Лучше всего использовать в качестве метода очистки данных в сочетании с другими методами

Решение	Суть группы методов	Сила	Слабость
<i>Edited Nearest Neighbours</i> [45, 48]	Представители класса большинства исключаются, если более половины из K их соседей не принадлежат к классу большинства	Уменьшает ошибку неверной классификации представителя класса большинства	Не может контролировать количество недостаточной выборки
<i>Tomek Links</i> [3, 45, 49]	Исключаются представители класса большинства, находящиеся в непосредственной близости от объектов класса меньшинства	Все образцы, которые являются ближайшими соседями друг к другу, принадлежат одному и тому же классу, который может быть лучше классифицирован	
<i>Neighbourhood Cleaning Rule</i> [45]	Эта стратегия также направлена на то, чтобы удалить те примеры, которые негативно влияют на исход классификации классов меньшинства. Для этого все примеры классифицируются по правилу трех ближайших соседей	Повышает точность классификации представителей классов меньшинства	Может привести к такому уменьшению объема выборки, которого будет недостаточно для обучения
<i>Condensed Nearest Neighbour</i> [45, 50]	Метод позволяет находить отличие между похожими примерами, но принадлежащими к разным классам.	Поиск отличий между похожими примерами, но принадлежащими к разным классам.	

Алгоритм реализации *NearMiss* библиотеки *imblearn Python* (библиотека включает в себя набор инструментов для несбалансированного набора данных в машинном обучении) предусматривает 3 стратегии отбора представителей классов, а именно:

1 стратегия (*version=1*). Выбор наблюдений из класса большинства, для которых среднее расстояние до k ближайших наблюдений из класса меньшинства является наименьшим (по умолчанию $k=3$, вариативный параметр при обучении). Будут сохранены только те наблюдения без опасных событий, которые наиболее близки к наблюдениям с опасными событиями;

2 стратегия (*version=2*). Выбор наблюдений из класса большинства, для которых среднее расстояние до k самых дальних наблюдений класса меньшинства является наименьшим (по умолчанию $k=3$, вариативный параметр при обучении). Будут сохранены только те наблюдения без опасных событий, которые находятся в центре масс пересечения множеств классов большинства и меньшинства;

3 стратегия (*version=3*). Сначала для каждого наблюдения из класса большинства будут сохранены их M ближайших соседей (по умолчанию $M=3$, вариативный параметр при обучении). Затем выбираются наблюдения из класса меньшинства, для которых среднее расстояние до N ближайших соседей является наибольшим (по умолчанию $N=3$, вариативный параметр при обучении).

В отличие от исследований [1–4, 52, 53], объектом нашего внимания является не показатель точности или ошибки классификации, а детализация точности прогноза опасных событий и точности прогноза появления инцидентов. Кроме этого, из-за того, что 98% наблюдений относятся к классу большинства, следует ожидать,

что точность большинства обученных классификаторов будет составлять 98%. В таких условиях легко прийти к выводам некоторых исследователей о неэффективности методов балансировки классов.

В ходе исследования использовалось сочетание нескольких методов повышения качества классификации несбалансированных данных, а именно сочетание методов подбора параметров моделей (*GridSearchCV*) с методом *NearMiss* и различные функции качества.

Варьируемые в ходе эксперимента параметры:

1) в рамках функции *GridSearchCV*:

(1) *GBS*: *random_state*, *tol*, *max_depth*;

(2) *Logi*: *tol*, *class_weight*, *max_iter*, *solver*, *random_state*, *C*;

(3) *KNN*: *n_neighbors*, *weights*, *metric*;

(4) *DTC*: *criterion*, *max_depth*, *min_samples_split*, *max_features*;

2) функции качества: *max_error*, *balanced_accuracy*, *accuracy*, *neg_log_loss*, *explained_variance*, *neg_mean_squared_error*, *neg_mean_squared_log_error*, *neg_median_absolute_error*, *r2*;

3) параметры *NearMiss*: стратегии отбора представителей классов, количество представителей класса меньшинства, количество представителей класса большинства.

Схема эксперимента:

1) разделение выборки на основную и валидационную. К основной выборке относятся наблюдения, полученные до 2019 года, к валидационной – после 2019 года;

2) разделение основной выборки на тренировочную и тестовую. Метод – *train_test_split*, размер тестовой выборки – 20 %.

В ходе экспериментов определено, что лучшие показатели точности достигаются при функции качества neg_log_loss . В виду чрезвычайно малого количества представителей класса меньшинства (менее 2%) качество варьирования этого показателя не оказывает влияния на качество классификации. В ходе большинства экспериментов количество представителей класса меньшинства было фиксированным и равно максимально возможному.

Рассмотрим результаты экспериментов. На рис. 6 приведен график зависимости точности прогноза методом *GBC* появления событий в зависимости от количества представителей класса большинства на основной выборке со стратегий *NearMiss 2*.

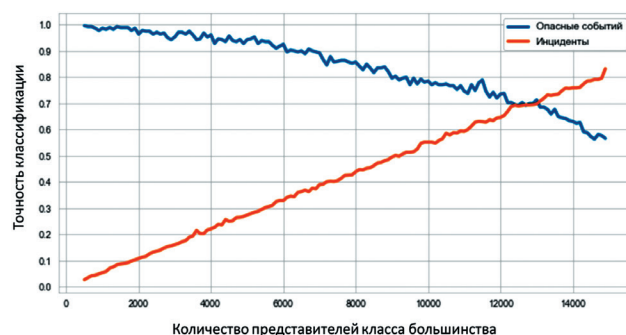


Рис. 6. Точность классификации на основной выборке, модель *GBC*, *NearMiss 2*

Стартовые характеристики точности (без применения метода *NearMiss*): точность на тестовой части обучающей выборки: 0,983; точность прогноза опасного события: 0,416; точность прогноза появления неопасного инцидента: 1. Как видно из рис. 6, существует точка пересечения графиков точности классификации опасных событий и инцидентов. По сути, чем выше будет находиться эта точка, тем точнее будет итоговая модель. Аналогичные графики получены для стратегии сэмплирования *NearMiss 1*. Точность в 70% выглядит хорошим результатом при стартовой точности классификации опасного события 41,6%. Следующий эксперимент был проведен при стратегии отбора № 2. Для удобства восприятия, на рис. 7 приведена только область пересечения графиков, характеризующих валидационную выборку.

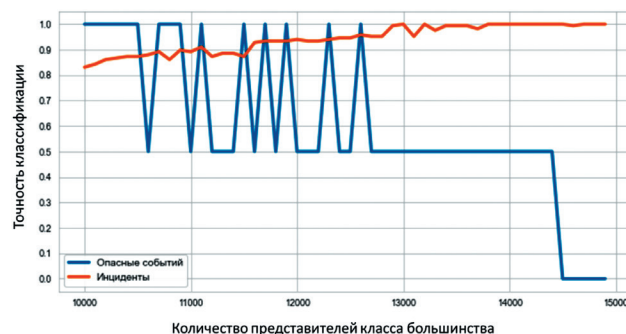


Рис. 7. Точность на валидационной выборке, модель *GBC*, *NearMiss 1*.

Точность работы классификатора на валидационной выборке (в-выборке) оказалась существенно выше точности на основной выборке. Анализ показал, что это связано с объемом в-выборки (классификатор не «успел» наделать ошибок), а также месяцами, для которых делался прогноз. Точность за аналогичные периоды из в-выборки в основной выборке оказалась выше, чем в среднем по всей выборке.

Прежде, чем перейти к анализу других данных, вернемся к вопросу использования показателя точности классификатора как характеристики эффективности. Точность классификатора *GBC* на несбалансированных данных составляла 0,983. При этом точность прогноза опасного события на в-выборке – 0. На сбалансированных данных точность составила 0,9811 (ниже, чем на оригинальном объеме выборки), а точность прогноза опасного события на в-выборке – 1,0, точность прогноза появления инцидента – 0,934. Аналогичные показатели были получены для других классификаторов. Таким образом, проводя исследования точности классификации несбалансированных данных, нельзя опираться на один «свернутый» показатель качества.

На рис. 8 и 9 приведены графики точности модели *Logi* для основной выборки и в-выборки на стратегии *NearMiss 1*.

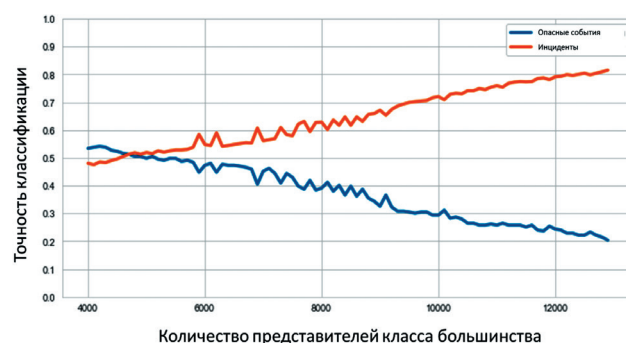


Рис. 8. Точность на основной выборке, модель *Logi*, *NearMiss 1*



Рис. 9. Точность на валидационной выборке, модель *Logi*, *NearMiss 1*

Из графиков на рис. 8 и 9 видно, что лучшие показатели точности для основной и в-выборки достигаются при различных балансах классов. Это свидетельствует о том, что отвергнутые на основании данных основной

выборки модели могут давать лучшие результаты на новых данных. Один из методов решения указанной проблемы – применение ансамблевых методов [56]. Основная идея изучения ансамбля классификаторов состоит в том, чтобы построить несколько классификаторов из исходных данных, а затем агрегировать свои прогнозы при классификации неизвестных образцов (рис. 10). Применение таких методов является перспективной исследования.

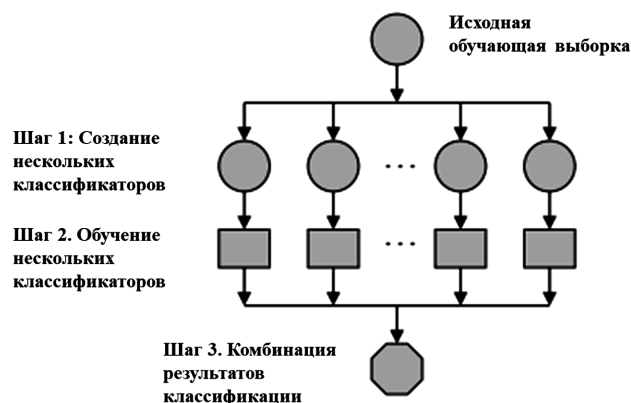


Рис. 10. Общий алгоритм работы ансамблевых методов

Анализ и выводы

По мере развития систем безопасности количество опасных событий становится все меньше, но при этом растет цена потенциальных последствий. Среди инцидентов с ЖЭс доля опасных событий не превышает 2% в год. Для повышения точности классификации и прогнозирования типов событий в условиях дисбаланса класса необходимо принять методы балансирования выборки.

В настоящее время активно используется более 50 методов, позволяющих работать с несбалансированными выборками. Однако в известных авторах публикациях не рассматривается вопрос анализа совместного изменения точности прогнозирования представителей классов меньшинства и большинства. В статье представлены графики точностей классификации инцидентов с объектами ЖЭс на обучающей и валидационной выборке.

Предложена схема работы с несбалансированными данными, включающая в себя сочетание нескольких методов повышения качества классификации несбалансированных данных, а именно: настройка параметров моделей, выбор показателя качества и соотношения количества представителей классов меньшинства и большинства с помощью метода *NearMiss*.

Применение методов работы с дисбалансом классов позволяет существенно повысить точность прогнозирования появления представителя класса меньшинства (опасного события) с 0 до 70-90%. Однако при повышении точности прогнозирования редкого события понижается точность прогнозирования появления представителя класса большинства.

Перспективами исследования являются: применение гибридных методов классификации и прогнозирования

событий, а также разработка метрики качества обучения, основанной на характеристике точки пересечения графиков точности классификации представителей различных классов.

Библиографический список

1. Севастьянов Л.А., Шетиние Е.Ю. О методах повышения точности многоклассовой классификации на несбалансированных данных // Информатика и ее применение. 2020. Том 14. № 1. С. 63-70.
2. Садов М.А. Исследование методов классификации текстов для несбалансированных данных // Полиматис. 2016. № 2. С. 28-41.
3. Маслихов С.Р., Мохов А.С., Толчеев В.Ю. Построение сбалансированных классов в задаче классификации запросов пользователей // Сборник трудов V Международной научно-практической конференции «Дистанционные образовательные технологии». 2020. С. 245-248.
4. Шипицын А.В., Журавлева Н.В. Оценка онлайн-заявок на ипотечный кредит с помощью алгоритмов Machine Learning // Вестник Белгородского университета кооперации, экономики и права. 2016. № 4(60). С. 199-209.
5. Chawla N.V., Bowyer W.B., Hall L.O. et al. SMOTE: Synthetic Minority Over-sampling Technique // Journal of Artificial Intelligence Research. 2002. № 16. P. 321-357.
6. Ali A., Shamsuddin S.M., Ralescu A. Classification with class imbalance problem: a review // International Journal of Advances in Soft Computing. 2013. № 7. P. 176-204.
7. Mladenic D., Grobelnik M. Feature selection for unbalanced class distribution and naive bayes // Proceedings of the Sixteenth International Conference on Machine Learning (ICML 1999), Bled, Slovenia, June 27–30, 1999. P. 258–267.
8. Yang T.-N., Wang S.-D. Robust algorithms for principal component analysis // Pattern Recognition Letters. 1999. 20(9). P. 927-933.
9. Yu H., Ni J., Zhao J. ACOSampling: An ant colony optimization-based undersampling method for classifying imbalanced DNA microarray data // Neurocomputing. 2013. 101(0). P. 309-318.
10. Chawla N.V. SMOTE: synthetic minority over-sampling technique // arXiv:1106.1813, 2002.
11. Garcia S., Herrera F. Evolutionary undersampling for classification with imbalanced datasets: Proposals and taxonomy // Evolutionary Computation. 2009. 17(3). P. 275-306.
12. Yin L. Feature selection for high-dimensional imbalanced data // Neurocomputing. 2013. 105(0). P. 3-11.
13. Sun Y. Cost-sensitive boosting for classification of imbalanced data // Pattern recognition. 2007. 40(12). P. 3358-3378.
14. Luukka P. Nonlinear fuzzy robust PCA algorithms and similarity classifier in bankruptcy analysis // Expert Systems with Applications. 2010. 37(12). P. 8296-8302.

15. Zheng Z., Wu X., Srihari R. Feature selection for text categorization on imbalanced data // ACM SIGKDD Explorations Newsletter. 2004. 6(1). P. 80-89.
16. Visa S., Ralescu A.L. Fuzzy Classifiers for Imbalanced Data Sets. University of Cincinnati, Computer Science Dept. Cincinnati, OH, United States, 2007. 157 p.
17. Imam T., Ting K., Kamruzzaman J. z-SVM: An SVM for Improved Classification of Imbalanced Data // AI 2006: Advances in Artificial Intelligence. 19th Australian Joint Conference on Artificial Intelligence, Hobart, Australia, December 4-8, 2006. Proceedings. P. 264-273.
18. Fernández A., M.J. del Jesus, Herrera F. Hierarchical fuzzy rule based classification systems with genetic rule selection for imbalanced data-sets // International Journal of Approximate Reasoning. 2009. 50(3). P.561-577.
19. Kriminger E., Principe J.C., Lakshminarayan C. Nearest Neighbor Distributions for imbalanced classification // The 2012 international joint conference on neural networks (IJCNN), Brisbane, QLD, Australia, 10-15 June 2012. P. 1-5.
20. Li Y., Zhang X. Improving k nearest neighbor with exemplar generalization for imbalanced classification // Advances in knowledge discovery and data mining: 15th Pacific-Asia Conference, PAKDD 2011, Shenzhen, China, May 24-27, 2011, Proceedings, Part II. P. 321-332.
21. Candès E.J. Robust principal component analysis // Journal of the ACM (JACM). 2011. 58(3). P. 11.
22. Japkowicz N., Myers C., Gluck M. A novelty detection approach to classification // IJCAI. Vol. 1. 1995. P. 518-523.
23. Jolliffe I. Principal component analysis // Encyclopedia of Statistics in Behavioral Science. John Wiley & Sons, Ltd, 2005.
24. Cao P., Zhao D., Zaiane O. An Optimized Cost-Sensitive SVM for Imbalanced Data Learning // Advances in Knowledge Discovery and Data Mining: 17th Pacific-Asia Conference, PAKDD 2013, Gold Coast, Australia, April 14-17, 2013, Proceedings, Part II. P. 280-292.
25. Cao P., Zhao D., Zaiane O. A PSO-based Cost-Sensitive Neural Network for Imbalanced Data Classification // Trends and Applications in Knowledge Discovery and Data Mining: PAKDD 2013 International Workshops: DMAPPS, DANTH, QIMIE, BDM, CDA, CloudSD, Gold Coast, QLD, Australia, April 14-17, 2013, Revised Selected Papers. P. 452-463.
26. Wang X., Shao H., Japkowicz N et al. Using SVM with Adaptively Asymmetric Misclassification Costs for Mine-Like Objects Detection // 2012 11th International Conference on Machine Learning and Applications, Boca Raton, FL, USA, 12-15 Dec. 2012. P. 78-82.
27. Yang P., Liu W., Zhou B.B. et al. Ensemble-based wrapper methods for feature selection and class imbalance learning // Advances in Knowledge Discovery and Data Mining: 17th Pacific-Asia Conference, PAKDD 2013, Gold Coast, Australia, April 14-17, 2013, Proceedings, Part I. P. 544-555.
28. Yu E., Cho S. Ensemble based on GA wrapper feature selection // Computers & Industrial Engineering. 2006. 51(1). P.111-116.
29. Liao J.-J. An ensemble-based model for two-class imbalanced financial problem // Economic Modelling. 2014. 37(0). P.175-183.
30. Liu Y., An A., Huang X. Boosting prediction accuracy on imbalanced datasets with SVM ensembles // Advances in Knowledge Discovery and Data Mining, 10th Pacific-Asia Conference, PAKDD 2006, Singapore, April 9-12, 2006, Proceedings. P. 107-118.
31. Seiffert C. RUSBoost: A hybrid approach to alleviating class imbalance // Systems, Man and Cybernetics. Part A: Systems and Humans. IEEE Transactions. 2010. 40(1). P.185-197.
32. Chawla N.V. SMOTEBoost: Improving prediction of the minority class in boosting, // Proceedings of Conference: Knowledge Discovery in Databases: PKDD 2003, 7th European Conference on Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases, Cavtat-Dubrovnik, Croatia, September 22-26, 2003. P. 107-119.
33. Wasikowski M., Chen X.-W. Combating the small sample class imbalance problem using feature selection // Knowledge and Data Engineering. IEEE Transactions. 2010. 22(10). P.1388-1400.
34. Martino M.D. Novel Classifier Scheme for Unbalance Problems // Pattern Recognition Letters. 2013. Vol. 34. Issue 10. P. 1146-1151.
35. Fernández A. A study of the behaviour of linguistic fuzzy rule based classification systems in the framework of imbalanced data-sets // Fuzzy Sets and Systems. 2008. 159(18). P. 2378-2398.
36. Le X., Mo-Yuen C., Taylor L.S. Power Distribution Fault Cause Identification With Imbalanced Data Using the Data Mining-Based Fuzzy Classification E-Algorithm // Power Systems. IEEE Transactions. 2007. 22(1). P. 164-171.
37. Soler V. Imbalanced Datasets Classification by Fuzzy Rule Extraction and Genetic Algorithms // Data Mining Workshops 2006. ICDM Workshops 2006. Sixth IEEE International Conference 2006.
38. Hung C.-M. Huang Y.-M. Conflict-sensitivity context learning algorithm for mining interesting patterns using neuro-fuzzy network with decision rules // Expert Systems with Applications. 2008. 34(1). P. 159-172.
39. Jeatrakul P., Wong K.W., Fung C.C. Classification of imbalanced data by combining the complementary neural network and SMOTE algorithm // Proceedings of the 17th international conference on Neural information processing: models and applications. Volume Part II. 2010. Springer-Verlag: Sydney, Australia. P. 152-159.
40. Malof J.M., Mazurowski M.A., Tourassi G.D. The effect of class imbalance on case selection for case-based classifiers: An empirical study in the context of medical decision support // Neural Networks. 2012. 25(0). P. 141-145.
41. Mazurowski M.A. Training neural network classifiers for medical decision making: the effects of imbalanced datasets on classification performance // Neural networks. 2008. 21(2-3). P. 427-436.
42. Culotta A. Sorensen J. Dependency tree kernels for relation extraction // Proceedings of the 42nd Annual Meet-

ing on Association for Computational Linguistics. Association for Computational Linguistics, 2004.

43. Drummond C., Holte R.C. Exploiting the cost (in) sensitivity of decision tree splitting criteria // ICML. 2000.

44. Al-Shahib A., Breitling R., Gilbert D. Feature selection and the class imbalance problem in predicting protein function from sequence // Applied Bioinformatics. 2005. 4(3). P. 195-203.

45. Kozierski M. Radial-Based Undersampling for imbalanced data classification // Pattern Recognition. 2020. Vol. 102.

46. He H., Bai Y., Garcia E.A. et al. ADASYN: adaptive synthetic sampling approach for imbalanced learning // IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IEEE World Congress on Computational Intelligence). 2008. P. 1322-1328.

47. Mani I., Zhang I. kNN approach to unbalanced data distributions: a case study involving information extraction // Proceedings of Workshop on Learning from Imbalanced Datasets. 2003. Vol. 126.

48. Wilson D.L. Asymptotic properties of nearest neighbor rules using edited data // IEEE Trans. Syst. Man Cybern. 1972. 2 (3). P. 408-421.

49. Tomek I. Two modifications of CNN // IEEE Trans. Syst. Man Cybern. 1976. 6. P. 769-772.

50. Hart P. The condensed nearest neighbor rule // IEEE Trans. Inf. Theory. 1968. 14(3). P. 515-516.

51. Махсотова Ц.В. Исследование методов классификации при несбалансированности классов // Научный журнал. 2017. №5 (18). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-metodov-klassifikatsii-pri-nesbalansirovannosti-klassov> (дата обращения: 5 июля 2020 г.).

52. Каврин Д.А., Субботин С.А. Методы количественного решения проблемы несбалансированности классов // Радиоелектроніка, інформатика, управління. 2018. №1 (44). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metody-kolichestvennogo-resheniya-problemy-nesbalansirovannosti-klassov> (дата обращения: 6 июля 2020 г.).

53. Yi Lu, Hong Guo, Feldkamp L. Robust neural learning from unbalanced data samples // 1998 IEEE International Joint Conference on Neural Networks Proceedings.

IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No.98CH36227), Anchorage, AK. 1998. Vol. 3. P. 1816-1821.

54. Al-Stouhi S., Reddy C.K. Transfer learning for class imbalance problems with inadequate data // Knowledge and Information Systems. 2016. 48. P. 201-228.

55. Near-Miss – version 0.9.0.dev0. API reference. URL: https://imbalanced-learn.org/dev/references/generated/imblearn.under_sampling.NearMiss.html (дата обращения: 10 июля 2021 г.).

56. Sun Y. Cost-Sensitive Boosting for Classification of Imbalanced Data // Pattern Recognition. 2007. Vol. 40. Issue 12. P. 3358-3378.

Сведения об авторах

Ольга Борисовна Проневич – начальник отдела АО «НИИАС», ул. Нижегородская, д. 27, стр. 1, Москва, Российская Федерация, 109029, тел +7 (495) 786-68-57; e-mail: obpronevich@gmail.com

Михаил Вадимович Зайцев – ведущий специалист АО «НИИАС», ул. Нижегородская, д. 27, стр. 1, Москва, Российская Федерация, 109029, тел +7 (495) 786-68-57; e-mail: m.v.zaicev@mail.ru

Вклад авторов

Проневич О.Б. исследовала проблему дисбаланса классов при прогнозировании появления опасного события на объектах железнодорожного электроснабжения, провела анализ существующих методов работы с несбалансированными данными, а также серию экспериментов по исследованию влияния различных соотношений количества представителей классов меньшинства и большинства. Также автором определены перспективы исследования.

Зайцев М.В. провел анализ популярных методов классификации событий в условиях дисбаланса классов, провел исследование влияния различных стратегий отбора *NearMiss* на качество классификации опасных событий на железнодорожном транспорте.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Уважаемые коллеги!

Всемирная беда – пандемия коронавируса COVID-19, эта болезнь века – настигла и редколлегию журнала «Надежность». 18 июля 2021 г. от нее скоростно скончался наш коллега, товарищ, ответственный секретарь журнала Алексей Михайлович Замышляев. Ему был только 41 год. Смерть Алексея Михайловича поразила близких, друзей, коллег. Невозможно поверить, что с нами уже нет этого жизненного, умного, доброго человека. Ушел из жизни замечательный человек – друг, всегда готовый помочь всем, с кем он был рядом. Он всегда руководствовался советами старших товарищей. Очень уважительно относился к своим учителям. Он был прекрасным семьянином, опорой для родных и близких. Трепетно заботился о здоровье матери. Окружал жену и детей заботой и вниманием. Любил жизнь, и его любили все, с кем он жил, дружил, работал.

Алексей Михайлович был талантливым ученым. В 34 года он стал доктором технических наук. Автор большого количества публикаций, научных статей, книг. Много времени уделял развитию журнала «Надежность», его продвижению на Запад. Был членом рабочей группы по управлению техническими активами Международного союза железных дорог. Великолепный организатор – он сумел объединить сотни ученых и специалистов в единый сплоченный коллектив, способный решать задачи внедрения на железнодорожном транспорте современных цифровых технологий, таких как: цифровое моделирование, интеллектуальные системы управления, системы управления физическими активами железнодорожного транспорта с



применением искусственного интеллекта и других.

Алексей Михайлович всегда останется в памяти руководителей и работников российских железных дорог как блестящий специалист, решавший сложные вопросы управления железнодорожным транспортом. Он был главным конструктором целого ряда систем, на основе которых в настоящее время осуществляется управление безопасностью движения, техническими активами железнодорожного транспорта, а также управление станционной работой. Под его руководством созданы ведущие

информационные системы отрасли: Автоматизированная система технико-распорядительных актов железнодорожной станции ОАО «РЖД» (АС ТРА), Автоматизированная система управления безопасностью движения (АС РБ), Комплексная автоматизированная система учета, контроля, устранения отказов в работе технических средств и анализа их надежности (КАСАНТ), Комплексная автоматизированная система учета, расследования и анализа случаев технологических нарушений (КАСАТ), Единая корпоративная платформа управления ресурсами, рисками, и надежностью (ЕКП УРРАН), Автоматизированная система управления Ситуационного центра ОАО «РЖД» (ИКСАР СЦ) и многие другие.

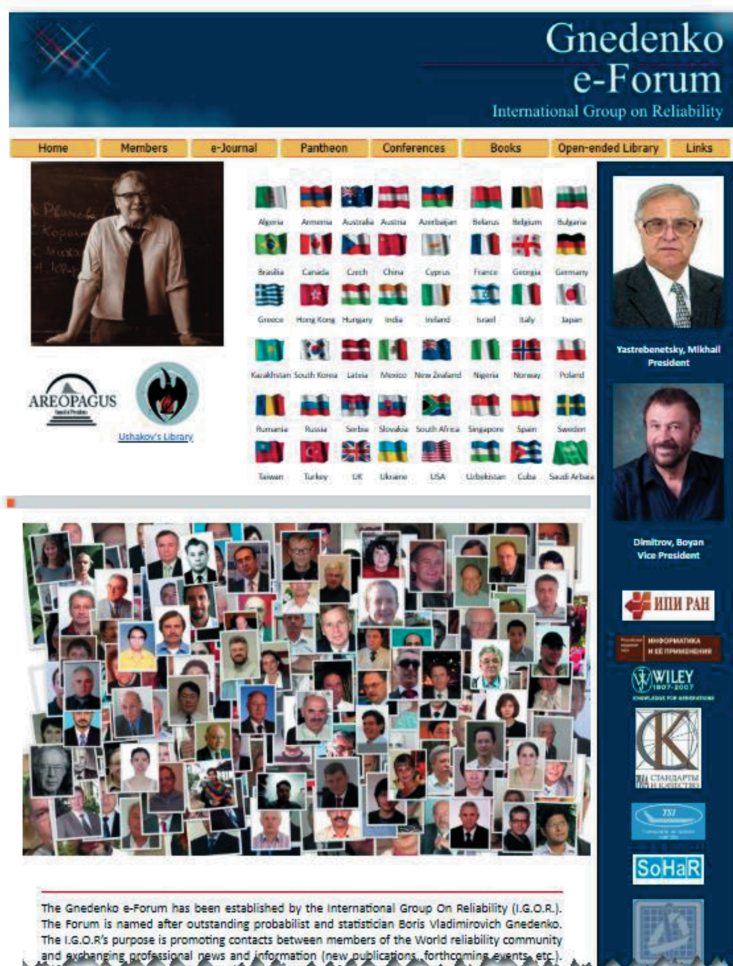
Он ушел от нас полным идей и планов по их превращению в жизнь. Хотел распространять накопленные знания, опыт на железных дорогах других стран, а также в смежных отраслях. Планировал обучать студентов. Любил жить интересно, насыщенно, активно. Любил семью, любил жизнь.

*Его всегда будет не хватать всем нам, кто дружил с ним, работал, общался.
Память об Алексее Михайловиче Замышляеве навсегда останется с нами!
Редколлегия журнала «Надежность»*



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 делаются отсылки, нумеруются арабскими цифрами, по порядку следования в тексте.

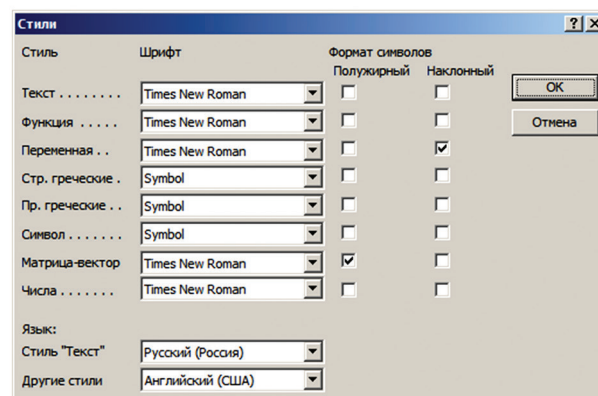
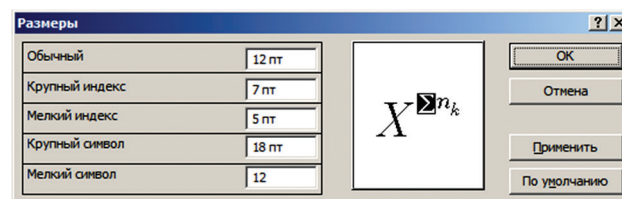
Простые формулы следует набирать без применения формульного редактора (использовать в MS Word русские и латинские буквы, а также меню «Вставка» + «Символ», если требуются греческие буквы и математические операторы), с соблюдением требуемого наклона для латинских символов, например:

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

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

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

тацией 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».

ЗАЯВКА НА ПОДПИСКУ НА ЖУРНАЛ «НАДЕЖНОСТЬ»

с № _____ 20__ г. по № _____ 20__ г., количество экз. _____

Полное наименование организации	
Юридический адрес предприятия (индекс, страна, адрес)	
Почтовый адрес предприятия (индекс, страна, адрес)	
ИНН/КПП	
Расчетный счет	
Банк	
Корреспондентский счет	
БИК	
Контактное лицо: Ф.И.О., должность	
Телефон/факс, e-mail	

Реквизиты: ООО «Журнал «Надежность»

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

Тел./факс: (495) 967-77-02, e-mail: dependability@bk.ru

ИНН 7709868505 КПП 770901001

р/с 40702810100430000017, ПАО «УРАЛСИБ БАНК» г. Москва

к/с 30101810100000000787

Адрес доставки:

Кому: _____

Куда: _____

Для оформления подписки на журнал «Надежность» заполните заявку и отправьте ее по факсу или электронной почте.

По всем вопросам, связанным с подпиской, обращайтесь в редакцию журнала.

Стоимость годовой подписки 4180-00 руб, в т.ч. НДС 10%.

Периодичность – 4 номера в год.

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