

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор:

Шубинский Игорь Борисович – доктор технических наук, профессор, эксперт Научного совета при Совете Безопасности РФ, генеральный директор ООО «ИБТранс» (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, начальник отдела анализа и ранжирования объектов контроля Администрации ООО «Газпром газнадзор» (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 Ega, (Дехрадун, Индия)

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

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

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

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

Уткин Лев Владимирович – директор высшей школы прикладной математики и вычислительной физики Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (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 ОАО «Областная типография
«Печатный двор». 432049, г. Ульяновск,
ул. Пушкирева, 27.

Подписано в печать 17.06.2020
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») И ООО «ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «ТЕХНОЛОГИИ»

СОДЕРЖАНИЕ

Структурная надежность. Теория и практика

Похабов Ю.П. Надежность в цифровых технологиях..... 3

Тарарычкин И.А. Выбор сетевых структур трубопроводных систем стойких
к развитию смешанного повреждения 12

Дискуссия по терминологии надежности

От редакции 18

Нетес В.А. Принципы стандартизации терминологии по надежности 19

Михайлов В.С. О терминах надежности 24

Функциональная надежность и функциональная живучесть. Теория и практика

Иванов А.И., Банных А.Г., Серикова Ю.И. Учет влияния корреляционных
связей через их усреднение по модулю при нейросетевом обобщении стати-
стических критериев для малых выборок 28

Ермаков А.В., Сучкова Л.И. Разработка алгоритмов для надежного обмена
данными между автономными роботами на основе принципов
самоорганизующейся сети..... 35

Безопасность. Теория и практика

**Шубинский И.Б., Замышляев А.М., Проневич О.Б., Платонов Е.Н.,
Игнатов А.Н.** Применение методов машинного обучения для прогнозирования
опасных отказов объектов железнодорожного пути 43

Озеров А.В. Перспективы повышения функциональной безопасности систем
железнодорожной автоматики и телемеханики в условиях цифровизации 54

Гнеденко – Форум 65

Надежность в цифровых технологиях

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



Юрий П. Похабов

Резюме. Цель. Переход на цифровые технологии индустрии 4.0 позволит в недалеком будущем создавать все больше изделий с уникальными потребительскими свойствами «с первого предъявления» (фактически без материальных затрат на экспериментальную обработку и доработку конструкций по результатам испытаний). Обеспечить расчеты показателей надежности таких изделий достоверными статистическими данными будет крайне затруднительно. Однако потребность в надежных изделиях останется. При этом сами подходы к цифровым технологиям на основе физических моделей и инженерных знаний дают возможность создать прогнозные методы обеспечения надежности (исходя из недопустимости либо, наоборот, умышленного программирования отказов). Это неизбежно ведет к смене парадигмы современной теории надежности, связанной с вынужденным отходом от математических моделей теории надежности в качестве базовых.

Методы. В отечественных традициях принято определять надежность путем задания требуемых функций набором параметров, характеризующих способность их выполнения, и допустимых пределов изменения значений этих параметров. Если критерии каких-либо из требуемых функций не могут быть установлены с помощью параметров, то можно использовать прием, согласно которому функционирование объекта подменяют информационной моделью в виде черного ящика, в котором выполнение требуемых функций характеризуют вероятностными показателями отказов (статистическими, логическими, байесовскими, субъективными). Чтобы с единых позиций учесть параметры и вероятности выполнения требуемых функций, нахождение значений параметров в допустимой области можно характеризовать вероятностью, как степенью уверенности в совершении такого события, например с учетом конструктивных запасов. В этом случае выполнение всех требуемых функций может быть охарактеризовано аддитивным показателем надежности, который определяют методом структурной схемы надежности. Такой показатель в полной мере характеризует прогнозный уровень надежности. **Результаты.** Оценку прогнозируемой надежности производят с помощью методики конструкторско-технологического анализа надежности (КТАН). Эта методика позволяет с помощью набора алгоритмизированных методов представить конструкторскую (по ГОСТ 2.102) и технологическую (по ГОСТ 3.1102) документацию технического объекта в виде обобщенной параметрической модели функционирования. Такая модель позволяет учитывать индивидуальные конструктивные особенности изделий исходя из единства функциональности, работоспособности и надежности, и на этой основе оценивать вероятности возможных отказов. Алгоритмы проведения КТАН и цифровых технологий проектирования полностью совместимы и обусловлены общими задачами по обоснованию конструкторских решений для исключения (снижения вероятности) ошибок, способных вызвать отказы, на основе аналитической, расчетной и экспериментальной верификации. **Выводы.** Цифровые технологии предоставляют реальную возможность прогнозировать, смягчать или исключать возможные отказы. Достичь этого можно точно такими же подходами, которые подчас и приводят к отказам, – конструкторско-технологическими. Для этого необходимо создавать новые приложения современной теории надежности на базе инженерных дисциплин и конструкторско-технологических методов обеспечения качества и надежности изделий.

Ключевые слова: цифровые технологии, теория надежности, прогнозирование надежности, уникальная высокоответственная система, конструкторско-технологический анализ надежности (КТАН).

Для цитирования: Похабов Ю.П. Надежность в цифровых технологиях // Надежность. 2020. № 2. С. 3-11. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-2-3-11>

Поступила 24.01.2020 г. / После доработки 17.04.2020 г. / К печати 17.06.2020 г.

Введение. На закрытии конференции MMR-2004 в Санта-Фе (США) состоялась дискуссия «Жива ли еще теория надежности?», которая послужила лейтмотивом статьи И.А. Ушакова, подытоженной словами: «Нужда в чистой теории, может быть, и спала, но нужда в приложениях теории надежности к решению практических задач была, есть и будет!» [1]. Список задач, ожидающих создания новых приложений теории надежности, был опубликован четырьмя годами раньше – на пленарном заседании конференции MMR-2000 в Бордо (Франция) в докладе «Надежность: прошлое, настоящее, будущее» [2]. Несмотря на вполне понятный вектор приложения усилий, некоторые из перечисленных проблем теории надежности так до сих пор и не разрешены, например вопросы надежности уникальных высокоответственных систем (изделий, объектов) [3].

За прошедшие годы к нерешенным проблемам теории надежности добавились новые задачи в свете четвертой промышленной революции [4]. Современному поколению инженеров сложно даже представить, к каким технологическим сдвигам приведут результаты этой революции, но начинать готовиться к этому приходится прямо сейчас. Пока же, как предтеча прогнозируемого будущего, возникли и начинают развиваться новые направления в инженерной деятельности: системная инженерия (проектирование «с первого раза правильно») [5] и цифровые технологии индустрии 4.0 (создание продукции «с первого предъявления») [6]. Набирает обороты тенденция, согласно которой показатели надежности в цифровой инженерии уже не рассматриваются в качестве целевых. Считается, что в случае достижения заданных целевых показателей работоспособности и ресурсных ограничений (временных, финансовых, технологических, производственных и т. д.) надежность обеспечивается сама собой по умолчанию [5, 6]. Например, остаточный ресурс изделия теперь может быть задан и определен в явном (параметрическом) виде по результатам численного моделирования физических процессов, приводящим к его потере. Само понятие «надежность» начинает размываться: надежность в цифровых технологиях, вроде бы, никуда не делась (ее по-прежнему надо обеспечивать), но как контролировать показатели надежности – непонятно (большая часть процессов при разработке и отработке изделий переносится в виртуальную область вычислений, производство материальных объектов, в первую очередь, для экспериментальной отработки сводится к минимуму, а математический аппарат современной теории надежности оказывается к этому не приспособленным). Однако, самое главное, никого уже сегодня не устраивает основа современной теории надежности – это, по выражению А.С. Проникова, констатация того или иного уровня надежности для машины, уже отработавшей свой ресурс [7].

Если при решении предстоящих задач подходы к надежности не изменятся, то для следующего поколения инженеров ценность современной теории надежности

рискует исчезнуть, как не дающая пищи для новых инженерных идей. С этим ничего не поделаешь, так было и так будет: «Мы знаем, что у каждого поколения есть свои проблемы, которые последующее поколение или решает, или отбрасывает как бесполезные и заменяет на новые» [8]. И тут уж в пору задаться вопросом куда более кардинальным, чем в начале 2000-х годов, а нужна ли нам вообще в эпоху цифровых технологий теория надежности?¹ Задаваясь таким провокационным вопросом, автор ни в коей мере не отвергает теорию надежности, сопромат или любые другие инженерные (технические) дисциплины, и потому склонен понизить его остроту другим вопросом, а каким требованиям в эпоху цифровых технологий должны удовлетворять приложения теории надежности и другие инженерные дисциплины?

Задачи теории надежности для цифровых технологий. Поскольку любые технические объекты создают инженеры, использующие в работе компьютеры, то справедливо полагать, что навыки и умения владения расчетными формулами в эпоху компьютерных технологий также необходимы и важны, как и в докомпьютерные времена (хотя бы для осознания результативности своей работы). Тем более что компьютер – это всего лишь высокоскоростное устройство для проведения вычислений (будь то выполнение чертежей, либо численные расчеты методом конечных элементов). При решении инженерных задач компьютер не осуществляет самостоятельного поиска областей, в которых должен находиться конечный результат, а лишь производит заданные вычисления по установленному алгоритму. Прерогатива человека заключается в том, чтобы, задав соответствующие исходные данные, направить имеющиеся ресурсы компьютера в требуемую область для получения наиболее оптимального результата [10]. Без знания законов естественных наук, владения техническими дисциплинами и умения делать элементарные инженерные расчеты справиться с такой задачей на должном уровне вряд ли получится. Тем более что (согласно одному из своих терминологических определений по ГОСТ 27.002–2015) надежность призвана быть своего рода вершиной инженерных знаний (для определения «значений всех параметров, характеризующих... *требуемые функции*»), и в эпоху компьютерных технологий не только не теряет своего значения, но приобретает еще большую значимость. Во-первых, выполнение объектами требуемого служебного назначения с заданной надежностью так и останется главной целью любой разработки. Во-вторых, отказы при наработке (в зависимости от назначения объектов) должны стать прогнозируемыми (недопустимыми либо, наоборот, умышленно программируемыми). Как раз для

¹ Как бы не казался такой вопрос несурзанным, но сегодня на полном серьезе обсуждается идея, что современному инженеру, работающему с компьютерными вычислениями, знания сопромата уже ни к чему, поскольку их заменит программное обеспечение [9].

этого и предназначены цифровые технологии – моделировать неблагоприятные сценарные события и тем самым способствовать выбору оптимальных результатов. По мнению автора, собственно на решение этих задач должны быть направлены новые приложения современной теории надежности, чтобы успеть оказаться полезными при реализации цифровых технологий.

Барьеры современной теории надежности на пути цифровых технологий. Компьютерные вычисления производят по заданным алгоритмам (точным предписаниям, определяющим последовательность элементарных операций над исходными данными), будь то простейшие арифметические действия или численные решения дифференциальных уравнений. Рассчитать надежность с помощью компьютерных вычислений напрямую невозможно, поскольку ее нельзя выразить, вычислить или измерить с помощью физических величин, в первую очередь, из-за многофакторности и междисциплинарности возможных причин отказов, которые не поддаются алгоритмизации. По этой причине в докомпьютерные времена для расчета показателей надежности был создан специальный математический аппарат, который позволяет определять надежность с помощью апостериорных знаний о возможных отказах, т. е. по сути дела – через известную из опыта ненадежность. В результате получился замкнутый и порочный круг, чтобы вычислить надежность какого-либо технического объекта, нужно обязательно знать его ненадежность. Имея соответствующие статистические данные об отказах, сделать это несложно; трудности начинаются тогда, когда неоткуда взять статистику отказов, например, если прототипы еще не существуют, объекты являются единичными (уникальными)¹ или же по условиям функционирования отказы недопустимы. Как поступать в таком случае, не может подсказать ни один нормативно-методический документ по надежности.

В справочном приложении к ГОСТ 27.002–89² в явном виде указано, что область расчетов показателей надежности (согласно правилам статистической теории надежности) ограничена исключительно крупносерийными объектами. Для уникальных и малосерийных объектов применение расчетов методами статистической теории надежности ограничено лишь теми случаями, когда расчет показателей надежности может быть проведен по известным показателям надежности компонентов и элементов. Теоретически такая возможность обоснована, например, в работе [11], но для этого необходимо знать данные по надежности компонентов и элементов,

которые можно получить из статистических испытаний в объеме требуемой генеральной совокупности, что, например, для уникальных высоконадежных систем сделать практически невозможно по финансово-экономическим ограничениям [12].

С внедрением цифровых технологий проблема расчета надежности на базе статистической теории надежности усугубляется, поскольку число отработочных (инженерных) моделей при разработке и постановке продукции на производство должно неизбежно сократиться за счет переноса в виртуальную среду реальных процессов (действий, проверок и испытаний), связанных с материальными объектами [6]. Таким образом, в условиях применения цифровых технологий исчезает базис статистических методов теории надежности – накопление и обработка статистической информации об отказах объектов. Задавать вероятностные показатели надежности в качестве исходных данных для цифровых вычислений становится бессмысленно не только с позиций фундаментальных основ статистической теории надежности (из-за отсутствия сведений по отказам). Сама вероятность, являясь численной мерой проявления событий, абстрагированной от алгоритма их совершения, не подлежит прямым компьютерным вычислениям.

Тем не менее, если можно вычислить значение некоего параметра и соотнести его с крайними допустимыми значениями, то уместно говорить о вероятности нахождения значения данного параметра в допустимой области (как степени уверенности в совершении такого события³). Если технический объект можно представить набором параметров и допустимыми ограничениями их значений, то это дает возможность определять его надежность как аддитивный показатель, характеризующий выполнение требуемого служебного назначения при моделировании возможных сценарных событий при функционировании (по сути, как показатель прогнозируемой надежности). Подсчитать благоприятные (неблагоприятные) исходы таких событий для современных компьютеров не представит труда, если будет задан соответствующий алгоритм вычислений. Однако современные приложения теории надежности таких алгоритмов не предоставляют.

Современный уровень решения задач надежности высокоответственных объектов. Барьеры современной теории надежности на пути цифровых технологий в равной степени являются препятствиями и при создании высокоответственных объектов без прототипов. Отсутствие необходимых статистических данных и сложность проведения расчетов показателей надежности привели к пониманию того, что сами по себе расчеты выполняют всего лишь вспомогательную функцию для принятия

¹ Единичное (уникальное) изделие: Единственное по своей конструкции или по большой редкости и значимости изделие [ОСТ 134-1032–2003, статья 3.1].

² ГОСТ 27.002–89 отменен с 2017 г., но справочное приложение к нему вполне можно считать отдельным источником, поскольку оно написано на основании 12 публикаций, большинство из которых являются хрестоматиями современной теории надежности.

³ Вероятность: Действительное число в интервале от 0 до 1, относящееся к случайному событию. Примечание: Число может отражать относительную частоту в серии наблюдений, или степень уверенности в том, что некоторое событие произойдет. Для высокой степени уверенности вероятность близка к единице. [ГОСТ Р 50779.10–2000, статья 1.1].

конструкторских решений при разработках, уступая главенствующую роль методам экспертной и верификационной деятельности, что отражено за рубежом в нормативных и литературных источниках:

- ...следует отметить, что значение параметра надежности является условным показателем вероятности отказов. Он используется скорее, как средство для развития последовательных проектных правил, чем для описания частоты отказов конструкций, – одно из разъяснений, содержащихся в стандарте европейской системы проектирования Eurocode EN 1990:2002;

- ...более важно идентифицировать и, по возможности, смягчить последствия видов отказов мерами проектирования, чем знать вероятность их проявления, – пояснение к определению видов отказов в IEC 60812:2006;

- ...все методы оценки надежности требуют экспертных оценок специалистов. Когда мы подходим к этому, значения вероятностей во многом напоминают бирку, которую инженер навешивает на какую-то конструкцию, чтобы показать, что он думает про ее надежность, – высказывание Charles Harlan – руководителя по безопасности и надежности космической программы «Space Shuttle» [13].

Указанные взгляды реализованы в положениях стандартов NASA и ESA, где расчеты являются одной из составных частей процессной деятельности по аналитической и экспериментальной верификации ракетно-космической техники. Однако результаты такой верификации на практике пока оставляют желать лучшего. Например, после гибели шаттла «Челленджер» STS-51L применение одного из основных средств аналитической верификации – метода FMEA – подверглось резкой критике в американских инженерных кругах [13]. Согласно результатам предварительного анализа возможных отказов и их последствий, был допустим лишь один из 10 000 полетов, который мог бы завершиться катастрофой. Однако на практике в результате 135 полетов погибли два шаттла («Челленджер», 1986 и «Колумбия», 2003). Такая ошибка при использовании FMEA является беспрецедентно катастрофичной – безотказность по факту составила 0,985, вместо прогнозируемой 0,999 9. Аналогичный результат следует из статистики отказов раскрывающихся конструкций на зарубежных и российских космических аппаратах за 2009–2016 гг. Средняя безотказность срабатывания механизмов раскрытия не превысила значений 0,996 вместо допустимой безотказности не ниже 0,999 5 (с оговорками, допускающими, что такая оценка является сильно завышенной из-за неполной статистики отказов) [14]. Следует учитывать тот факт, что на практике в каждом случае результаты расчетов (верификации) надежности по действующим нормативам обязаны подтверждать указанную выше допустимую безотказность, иначе запуски космических аппаратов попросту бы не состоялись из-за необоснованности разработки. Чтобы выяснить, почему же результаты оценки надежности не

соответствуют действительности, были проведены исследования реальных причин отказов, которые показали, что в подавляющем большинстве случаев они имеют редкий характер, определяемый неблагоприятным сочетанием допусков на изготовление, неучтенными факторами технологической наследственности и внешних воздействий, что современные методики верификации надежности не учитывают [14]. Выявлено также, что для высокоответственных изделий любая редкая причина отказа способна понизить точность оценки надежности, при этом суммарная ошибка расчета на практике может достигать не менее порядка величины значащей цифры¹, что и подтверждается приведенными выше примерами.

Подход к прогнозированию надежности высокоответственных объектов. Предположим, что функционирование любого объекта можно представить набором параметров, значения которых могут изменяться в заданных диапазонах своих значений (т. е. в строгом соответствии с одним из определений термина «надежность»). Каждый из таких параметров рассматривается с позиций сопротивляемости возможным отказам под действием внешних воздействий, которые в свою очередь определяют ограничения на изменения значений анализируемых параметров [15]. В этом случае, сочетая параметры воздействий и сопротивляемости, на основе физических законов природы можно построить модель безотказного функционирования с учетом изменения во времени предельных значений рассматриваемых параметров, которая, в отличие от математических моделей теории надежности, становится пригодной для прогнозирования надежности (пример подобной модели для поворотной штанги космического аппарата приведен в работе [16]). В такой модели сам перечень этих параметров будет характеризовать функциональность объекта (совокупность свойств, определяемых наличием и набором возможностей выполнять требуемые функции), заданный диапазон изменения значений параметров – его работоспособность (состояние, в котором объект способен выполнять требуемые функции), а вероятность нахождения значений параметров в заданном диапазоне при функционировании – надежность (свойство сохранять во времени выполнение требуемых функций в заданных режимах и условиях эксплуатации) [16].

Если исходить из того, что все отказы объекта происходят исходя из физичности (закономерностей причинно-следственных связей) и физической необходимости (непротиворечия законам природы) порождающих их причин (не зависимо от того, знаем мы эти причины или нет), то на основе знаний законов физической природы можно построить параметрическую модель функционирования объекта, определяющую его функциональность,

¹ По аналогии с инженерными расчетами – это соответствует точности искомого результата не на проценты (обычно нормой считается погрешность 5÷10%) и даже не в разы (например, в два-три раза), а на порядки, т. е. не менее, чем в десять-сто раз (!).

работоспособность и надежность на основе единой информационной базы – параметров и диапазонов их допустимых значений. Построение такой модели обусловлено знаниями физических основ природы на уровнях микромира (мира элементарных частиц, атомов, молекул и молекулярных соединений), макромира (мира устойчивых форм и соизмеримых человеку величин) и мегамира (окружающего мира, соразмерного со вселенной). Значения параметров параметрической модели функционирования вычисляют известными методами инженерных дисциплин – теории машин и механизмов, теоретической механики, сопротивления материалов, строительной механики, деталей машин и т. д.

Если знаний или пониманий на любом из уровней устройства мира недостаточно для вычисления значений параметров параметрической модели функционирования объекта, то можно использовать известный прием, согласно которому функционирование какой-либо из составных частей объекта подменяется информационной моделью в виде черного ящика, в котором выполнение требуемых функций характеризуют вероятностными показателями отказов (статистическими, логическими, байесовскими, субъективными). Чтобы учесть вероятностные показатели таких информационных моделей для расчета надежности с помощью обобщенной параметрической модели функционирования объектов, необходимо значения параметров и вероятностных показателей привести к согласованному безразмерному виду. Для этого определяют вероятность нахождения значений параметров в допустимом диапазоне (исходя из их физического понимания [16]), после чего все вероятности, независимо от своего происхождения (исходя из физических либо информационных моделей) окажутся пригодными для расчета надежности методом структурной схемы надежности [14, 16]. Причем это не противоречит идее расчета надежности уникальных и малосерийных объектов по известным показателям надежности компонентов и элементов.

Для определения вероятностей нахождения значений параметров в допустимых областях могут быть использованы два взаимозаменяемых метода: детерминированный (путем задания конструктивных запасов по каждому из параметров таким образом, чтобы гарантировать с определенным доверием нахождение их значений в допустимой области) [14] и стохастический (например, путем оценки конструкционной индивидуальной надежности [17], суть которой заключается в вычислении вероятностей нахождения параметров в допустимых областях исходя из индивидуальных характеристик материалов, процессов нагружения/воздействий и технологий изготовления изделий). Взаимозаменяемость указанных методов можно пояснить на примере модели расчета прочности по схеме «параметр нагрузки – параметр прочности», когда вероятность безотказной работы совпадает с вероятностью того, что в пределах заданного отрезка времени значение параметра нагрузки ни разу не превысит значение, которое принимает па-

раметр прочности. При этом, даже если оба параметра являются случайными функциями времени, применяя конструктивные запасы согласно ГОСТ Р 56514–2015 – «расширяя» область действительных значений «параметра нагрузки» с помощью коэффициентов безопасности и/или «сужая» допустимую область «параметра прочности» за счет запасов прочности, можно решать задачу надежности в детерминированной постановке по расчетным значениям нагрузки и запасов прочности [16], что нашло широкое распространение в ракетно-космической отрасли.

Примеры применяемых на практике конструктивных запасов в виде резервирования, коэффициентов безопасности, запасов прочности и движущих моментов (сил), параметрической избыточности, силовых и температурных развязок, процедур получения гарантированных результатов, например, с применением минимаксных критериев или с использованием факторов инженерной психологии, приведены в работах [14, 16]. Все конструктивные запасы назначают исходя из правил статистической теории надежности (например, коэффициенты безопасности и запасы прочности [18]), подтвержденной практики применения (например, запасы движущих моментов (сил) [14, 19–20]), конструктивных приемов, направленных на снятие ограничений по изменению выходных параметров (например, путем использования силовых и температурных развязок [21–22]), или иных организационно-технических действий, снижающих либо исключающих вероятность возникновения отказов.

В общем случае, например для раскрывающихся конструкций космического аппарата, надежность по параметру «прочность» может быть рассчитана детерминированным методом по ГОСТ Р 56514–2015, а надежность по функционированию – стохастическим методом [20], либо в любых иных комбинациях [14, 17]. При этом использование конструктивных запасов для решения задач надежности в детерминированной постановке не только упрощает выбор и обоснование параметров при конструировании объектов, но является одним из важных условий по составлению исходных данных для цифрового проектирования в виде матрицы целевых показателей и их ограничений [6].

Конструкторско-технологические методы решения задач надежности высокоответственных объектов. Различные аспекты приведенного выше параметрического подхода к решению задач надежности высокоответственных объектов (философия, генезис, дефиниции, теоретические вопросы, модели, расчеты, практическое применение и т. п.) подробно рассмотрены в работе [14], что послужило основой разработки методики конструкторско-технологического анализа надежности (КТАН). Такая методика, опираясь как на инженерные дисциплины, так и на математические основы теории надежности (если это допустимо и обосновано), позволяет проводить анализ и учет индивидуальных конструктивных особенностей изделий,

что дает возможность прогнозировать надежность при проектировании и конструировании технических объектов без прототипов.

В основе методики КТАН лежит обобщенная параметрическая модель функционирования в виде [16]

$$\{X_i\} = (X_1, X_2, \dots, X_i)^T \quad \forall i = \overline{1, n}; \quad (1)$$

$$D_x = \{X_i(t) | \alpha_i \leq X_i(t) \leq \beta_i\}; \quad (2)$$

$$R = P\{X_i(t) \in D_x, 0 < t < t_k\}, \quad (3)$$

где $\{X_i\}$ – множество выходных параметров X_i , определяющих выполнение требуемых функций, в виде вектор-столбца (функциональность объекта); D_x – область допустимых значений выходных параметров $X_i(t)$ (работоспособность объекта в допустимых диапазонах изменения значений параметров – α_i и β_i); R – надежность объекта как вероятность P нахождения значений выходных параметров $X_i(t)$ в области их допустимых значений D_x за время наработки до отказа t_k .

Методика КТАН – это последовательный набор алгоритмизированных методов, позволяющих представить конструкторскую (по ГОСТ 2.102) и технологическую (по ГОСТ 3.1102) документацию технического объекта (которая в зависимости от способа разработки является его текстографической или цифровой моделью) в виде обобщенной параметрической модели его функционирования (1) – (3). Процедуры методики позволяют (укрупненно) производить:

- инициализацию объекта в виде параметризации (превращения его в набор параметров и допустимых диапазонов их изменения), которая проводится для установления условий (1) – (2);
- подсчеты теоретической надежности по параметрам проектирования, выполняемые согласно (3);
- предоставление доказательств того, что анализ (оценка) надежности соответствует действительности (требованиям конструкторской и технологической документации, условиям осуществления производства, методам контроля качества), для чего делают оценку соответствующих рисков [23].

Использование обобщенной параметрической модели функционирования (1) – (3) и методики КТАН [16] не нарушает базовых принципов теории надежности. Наряду с прикладными методами теории надежности (математическими, статистическими и физическими), конструкторско-технологические методы позволяют расширить возможности теории надежности по прогнозу надежности технических объектов и сделать решение задач надежности понятными и доступными для инженеров. Методика КТАН была опробована при конструировании механических устройств одноразового срабатывания космического назначения и узлов гидроавтоматики технологического оборудования нефтяных скважин [14], что позволило:

- обнаружить конструкторские и технологические ошибки в технической документации;
- произвести 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.

Сопоставимость КТАН с существующими прогнозными подходами к надежности. Идея проведения анализа (оценки) надежности с учетом конструкторских и технологических факторов не является оригинальной. Необходимость этого неоднократно отмечалась и обосновывалась, например, в работах [24–26]. Однако методик анализа и оценок конструктивно-технологических факторов, которые позволяют конструкторам высокоответственных систем принимать свои решения с учетом надежности (насколько известно автору), еще не разработано.

Отдельные аспекты учета конструктивных факторов, влияющих на надежность, хорошо известны в литературе. Например, основы расчета надежности по прочности изложены в работе [27], а подходы к расчетам надежности механических частей конструкции летательных аппаратов с учетом обеспечения прочности и функционирования при срабатывании механизмов раскрытия приведены, например, в работах [28, 29]. Параметры, по которым в указанных примерах проводят расчеты надежности, входят составной частью в вектор-столбец (1). Расчеты на работоспособность и надежность осуществляют по формулам (2) – (3) с учетом физических основ обеспечения искомых параметров. Однако, как показывает практика [14], для расчета высоконадежных систем необходимо учитывать дополнительные факторы, влияющие на надежность. Такими факторами могут служить, например, внезапное исчезновение зазоров в кинематических парах, недостаточная виброустойчивость соединений, попадание в механизм раскрытия посторонних предметов (технологических элементов или смежных частей конструкций), нестабильность настроек механизмов, недостаточный ход актуатора, несоблюдение или неустановление режимов выполнения особо ответственных операций и т. д. [14, 16–17, 23].

Для установления выходных параметров, влияющих на надежность, производят конструкторско-технологический анализ надежности [14, 16], результатом которого является параметрическое описание функциональности (1), работоспособности (2) и надежности (3) конструкции. Причем, применение метода парирования [14, 16], с помощью которого осуществляют переход от возможных

отказов к искомым выходным параметрам, фактически позволяет рассматривать модель (1) – (3) как условие безотказного функционирования конструкции. Это в значительной степени повышает эффективность аналитической верификации, например, с использованием методики FMESA [30], которая основана на выявлении неблагоприятных отказов по степени тяжести их последствий и проведении экспертных оценок рисков возможных отказов, но не дает ответа, как предотвратить саму возможность возникновения отказов. Применение КТАН позволяет управлять отказами путем выбора значений параметров конструкции в условиях заданных ограничений (режимов и условий применения) исходя из математических уравнений (1) – (3), которые отражают совокупность знаний, представлений и гипотез при реализации выходных эффектов на базе физических законов природы.

Говоря о методике КТАН, важно понимать, что ее использование не подменяет и не подрывает существующих основ надежности (где это возможно, необходимо следовать общепринятым нормам надежности). Однако при отсутствии информации о надежности составных компонентов и недостаточных статистических данных об отказах изделий, указанная методика дает возможность избежать значительной части конструкторско-технологических ошибок, в т. ч. приводящих к редким отказам. Использование КТАН позволяет подвергнуть сомнению утверждение о том, что для высокоответственных систем (0,997 и выше) расчеты надежности невозможны и даже бессмысленны [12]. В парадигме методики КТАН, расчеты надежности высокоответственных систем жизненно необходимы, но процедура их проведение требует нормативного закрепления [23].

Кроме того, применение КТАН само по себе является необходимым, но не достаточным условием создания высокоответственных систем. Как и любой другой инструмент, он требует умелого обращения. В данном случае – это знания физических принципов работы технических объектов, основ инженерных дисциплин и конструкторско-технологических методов обеспечения качества и надежности. Причем, все то же самое требуется и при использовании цифровых технологий проектирования. К счастью, необходимость следования установленному алгоритму проведения КТАН в совокупности с возможностью получения апостериорных знаний (по результатам испытаний и эксплуатации) позволяет накапливать знания с каждым итерационным циклом проведения анализов и, при необходимости, создавать перечни (чек-листы) принципов проектирования и правил конструирования [14, 28], соответствующих конкретной предметной области разработок (что только усиливает эффективность методики).

Совместимость и обусловленность КТАН и цифровых технологий. С позиций целевой направленности на прогнозирование надежности, методики КТАН и цифровых технологий проектирования используют общие

процедуры – это обоснование конструкторских решений для исключения (снижения вероятности) ошибок, способных вызвать отказы, на основе аналитической, расчетной и экспериментальной верификации.

При этом методика КТАН является прерогативой человека – специалиста по надежности, следовательно, в системе «человек-компьютер» может сыграть ключевую роль при составлении исходных данных для компьютерных вычислений, ведь от их полноты и достоверности напрямую зависит эффективность цифровых технологий как таковых.

Сегодня для построения матрицы целевых показателей и ограничений, а также валидации результатов вычислений, на каждом итерационном шаге предполагается привлекать экспертов, руководствующихся исключительно личными знаниями и опытом [6]. Использование модели и методики КТАН позволяет на алгоритмизированной основе производить подготовку и верификацию исходных данных для компьютерных вычислений по формулам (1) – (2) и валидацию их результатов согласно (3). В результате чего решаются две задачи:

- отпадает необходимость в поисках уникальных и дорогостоящих экспертов (которых может в нужное время просто не оказаться под рукой);
- инженер в системе «человек-компьютер» получает возможность использовать системный подход, повышающий эффективность принимаемых им решений и позволяющий выполнять четкие действия при подготовке и проведении компьютерных вычислений.

Реализацию последней из указанных задач сложно переоценить. Технические и программно-вычислительные возможности компьютеров постоянно растут, а возможности человека, как творца техники, в последние годы напротив ухудшаются – качество его мышления не улучшается, аналитические способности не повышаются, а образовательная подготовка заметно упала. Если и дальше не повышать знания и не алгоритмизировать действия человека, все нарастающий разрыв в системе «человек-компьютер» способен привести к непредсказуемым последствиям, самым безобидным из которых может оказаться пророчество Роберта Шекли в рассказе «Верный вопрос».

Теоретически, моделируя работу технических объектов на уровне микро-, макро- и мегамира, можно получить обобщенную параметрическую модель функционирования (1) – (3), состоящую исключительно из параметров (принципы построения цифровых моделей этому не препятствуют и ограничены только вычислительными ресурсами). В этом случае потребуется лишь автоматизированная опция, позволяющая производить аддитивный подсчет (калькулирование) прогнозируемой надежности в результате проведения требуемых мероприятий по предупреждению отказов конструкционного характера. В противном случае (если не хватает знаний человека или вычислительных возможностей компьютера) необходимо участие человека в корректировке каль-

кулирования прогнозируемой надежности путем учета факторов, которые требуют вероятностных оценок на основе информационных моделей в виде черного ящика.

Использование КТАН в цифровых технологиях может оказаться незаменимым в случае проведения топологической оптимизации конструкций. В этом случае важно различать цели решаемых задач. Одно дело, когда топологическую оптимизацию проводят для сокращения издержек производства, другое дело, если сокращение таких издержек способно привести к рискам возникновения несоизмеримо больших потерь, чем выгода от сэкономленных средств при изготовлении. Например, масса конструкции механического узла космического назначения за счет топологической оптимизации может быть снижена на 1 кг, что приводит к экономии порядка 10^3 у.е. за счет цены заготовок на рынке и стоимости технологического передела. Однако несрабатывание механизма на орбите в результате проведенной топологической оптимизации способно привести не только к потерям порядка 10^6 у.е., соответствующим удельной стоимости выведения полезного груза, но и куда более критичным убыткам в виде стоимости потерянного космического аппарата и времени на его создание, затрат на повторное изготовление спутника и финансовых потерь из-за возможных репутационных издержек (например, удорожания стоимости страхования космических рисков). В этом случае прогноз надежности становится приоритетной задачей, решение которой должно строиться на научно-методологической основе.

Заключение. Цифровые технологии предоставляют реальную возможность прогнозировать, смягчать или исключать возможные отказы. Достичь этого можно точно такими же подходами, которые подчас и приводят к отказам, – конструкторско-технологическими. Для этого необходимо создавать новые приложения современной теории надежности на базе инженерных дисциплин и конструкторско-технологических методов обеспечения качества и надежности изделий.

Прошу всех, кого заинтересовали проблемы, изложенные в статье, высказаться, в т. ч. лично (pokhabov_yury@mail.ru).

Библиографический список

1. Ushakov I.A. Is Reliability Theory Still Alive? [Электронный ресурс] // Reliability: Theory & Applications: сетевой журн. 2017. No. 3(46). Vol. 12. P. 45-68. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/is-reliability-theory-still-alive-1/viewer> (дата обращения 15.04.2020)
2. Ушаков И.А. Надежность: прошлое, настоящее, будущее: пленарный доклад на открытии конференции «Математические методы в надежности» (MMR–2000), Бордо, Франция, 2000 // Надежность: Вопросы теории и практики: сетевой журн. 2016. No. 1(1). P. 17-27. URL: http://www.gnedenko.net/Journal/2006/RTA_1_2006.pdf (дата обращения 15.04.2020)
3. Похабов Ю.П., Ушаков И.А. О безаварийности функционирования уникальных высокоответственных систем // Методы менеджмента качества. 2014. № 11. С. 50–56.
4. Шваб К. Четвертая промышленная революция. М.: Эксмо, 2016. 138 с.
5. Левенчук А. Системноинженерное мышление в управлении жизненным циклом [Электронный ресурс] // Лабораторный журнал: [сайт]. [2014]. URL: <https://ailev.livejournal.com/1121478.html> (дата обращения: 15.04.2020)
6. Боровков А.И., Рябов Ю.А., Кукушкин К.В. Цифровые двойники и цифровая трансформация предприятий ОПК // Оборонная техника. 2018. № 1. С. 6–33.
7. Проников А.С. Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 592 с.
8. Hilbert D. Mathematical Problems // Bulletin of the American Mathematical Society: journal. 1902. Vol. 8. No. 10. P. 437–479.
9. Кулешов А.П. Преодолеть сопротивление материалов: интервью 2 Февраля 2018 г. [Электронный ресурс] // Стимул: журнал об инновациях в России [сайт]. [2018]. URL: https://stimul.online/articles/interview/preodolet-soprotivlenie-materialov/?sphrase_id=1295 (дата обращения: 15.04.2020)
10. Доронин С.В., Похабов Ю.П. Повышение достоверности оценок прочности конструкций технических объектов // Вестник машиностроения. 2013. № 6. С. 85–88.
11. Болотин В.В. Применение методов теории вероятности и теории надежности в расчетах сооружений. М.: Стройиздат, 1971. 255 с.
12. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 704 с.
13. Лернер Э. Альтернатива «запуску на авось» // Аэрокосмическая техника. 1987. № 9. С. 157–160.
14. Похабов Ю.П. Теория и практика обеспечения надежности механических устройств одноразового срабатывания. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2018. 338 с.
15. Плахотникова Е.В., Сафонов А.С., Ушаков М.В. Проектирование изделий с учетом требований к показателям надежности // Известия ТулГУ: Технические науки. 2015. Вып. 7. Ч. 1. С. 134–139.
16. 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.
17. Тимашев С.А., Похабов Ю.П. Проблемы комплексного анализа и оценки индивидуальной конструкционной надежности космических аппаратов (на примере поворотных конструкций). Екатеринбург: АМБ, 2018. 38 с.
18. Гладкий В.Ф. Вероятностные методы проектирования конструкции летательных аппаратов. М.: Наука, 1982. 524 с.
19. Золотов А.А., Похабов Ю.П., Гусев Е.В. Обеспечение проектной надежности раскрывающихся конструкций космических аппаратов // Полет. 2018. № 7. С. 36–45.

20. Похабов Ю.П. Способ выбора привода для поворота конструкции в шарнирном узле: пат. 2198387 Рос. Федерация. № 2000129330/28; заявл. 23.11.2000; опубл. 10.02.2003, бюл. № 4.

21. Похабов Ю.П., Гриневич В.В. Способ закрепления изделий: пат. 2230945 Рос. Федерация. № 2002113143/11; заявл. 18.05.2002; опубл. 20.06.2004, бюл. № 17.

22. Похабов Ю.П., Наговицин В.Н. Способ закрепления изделий статически неопределимой системой связей: пат. 2125528 Рос. Федерация. № 5067373/28; заявл. 29.09.1992; опубл. 27.01.1999, бюл. № 3.

23. Похабов Ю.П. Что понимать под расчетом надежности уникальных высокоответственных систем применительно к механизмам одноразового срабатывания космических аппаратов // Надежность. 2018. Т. 18. № 4. С. 28–35.

24. Hecht H., Hecht M. Reliability prediction for spacecraft: Report prepared for Rome Air Development Center: no. RADC-TR-85-229, Dec. / Rome Air Development Center. 1985. 156 p.

25. Saleh J.H., Caster J.-F. Reliability and Multi-State Failures: A Statistical Approach, First Edition. NJ.: John Wiley & Sons, 2011. 206 p.

26. Тестоедов Н.А., Михнев М.М., Михеев А.Е. и др. Технология производства космических аппаратов. Красноярск: СибГАУ, 2009. 349 с.

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

28. Bowden M.L. Deployment devices // Space Vehicle Mechanisms: Elements of Successful Design: Edited by Peter L. Conley. NJ.: John Wiley & Sons, 1998. P. 495–542.

29. Кузнецов А.А. Надежность конструкции баллистических ракет. М.: Машиностроение, 1978. 256 с.

30. ECSS Standard. Space product assurance. Failure modes, effects (and criticality) analysis (FMEA/FMECA) (6 March 2009). ECSS Secretariat, ESA ECSS-Q-ST-30-02C. 74 p.

Сведения об авторе

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

Вклад автора в статью

Статья является результатом многолетней практики (с 1982 г.) проектирования, конструирования и обеспечения надежности механизмов раскрытия космических конструкций. С использованием авторской методики конструкторско-технологического анализа надежности (КТАН) в 2014–2019 гг. были проведены экспертизы отказоспособности механизмов раскрывающихся конструкций КА ведущих отечественных разработчиков (с выпуском научно-технических отчетов), которые выявили недостаточный уровень современных методов аналитической и экспериментальной верификации надежности в космической отрасли для обеспечения требуемой безотказности выше 0,999 и, как это не парадоксально, снижение качества разработок с позиций надежности при использовании цифровых технологий проектирования.

Выбор сетевых структур трубопроводных систем стойких к развитию смешанного повреждения

Игорь А. Тарарычкин, Луганский национальный университет им. В.Даля, Украина, Луганск
donbass_8888@mail.ru



Игорь А.
Тарарычкин

Резюме. Системы трубопроводного транспорта используют при доставке потребителям различных веществ, материалов, в том числе и необходимых для поддержания непрерывных производственных процессов. Функционирование таких сложных промышленных объектов связано с определенными рисками и возможностью отказа по различным причинам отдельных узлов и агрегатов. Рассмотрены особенности поведения систем трубопроводного транспорта при возникновении нештатных ситуаций. Развитие таких процессов может стать причиной отключения от источника некоторой части или всех потребителей целевого продукта. Процесс повреждения может происходить в соответствии со следующими механизмами: прогрессирующее повреждение, когда отдельные трубопроводы системы переходят в состояние неработоспособности случайным образом; прогрессирующая блокировка, когда в случайном порядке становятся неработоспособными отдельные транспортные узлы. Сценарий развития аварийной ситуации, при котором в системе возникают как процессы прогрессирующего повреждения линейных элементов, так и блокировки транспортных узлов, называется смешанным повреждением. **Целью работы** является разработка критериев оценки стойкости трубопроводных транспортных систем к смешанному повреждению, а также методов решения типовых задач синтеза сетевых структур, стойких к развитию этого процесса. **Методы исследования.** Способность конкретной системы противостоять развитию смешанного повреждения зависит от ее сетевой структуры и устанавливается с использованием метода имитационного моделирования. Структурные изменения при развитии смешанного повреждения описываются циклограммой, параметры которой указывают количество поврежденных линейных и заблокированных точечных элементов в течение одного цикла воздействия на систему. Сравнение способности сетевых структур противостоять развитию смешанного повреждения возможно только при условии их сопоставимости. Для этого анализируемые системы должны иметь в своем составе одинаковое количество узлов, линейных элементов, а также потребителей целевого продукта. Кроме того, все эти системы должны быть подвергнуты смешанному повреждению с одинаковой циклограммой. **Результаты.** При моделировании процедуры смешанного повреждения определялись такие характеристики процесса как средняя доля линейных элементов системы, повреждение которых приводит к разрыву связи всех потребителей с источником, а также средняя доля узлов, блокировка которых приводит к полному отключению от источника всех потребителей. Разработанный метод оценки стойкости систем к развитию смешанного повреждения позволяет решать следующие практические задачи структурного синтеза: выбор положения источника целевого продукта на заданной сети; выбор места расположения в действующей системе новых потребителей; определение мест присоединения к системе дополнительных технологических фрагментов; выбор присоединительных линейных элементов при подключении к транспортной системе фрагментов расширения. **Выводы.** Смешанное повреждение является опасным сценарием развития аварии и сопровождается быстрой деградацией транспортных возможностей трубопроводных систем. Различные сетевые структуры обладают разной способностью противостоять смешанному повреждению, а характеристики их стойкости следует устанавливать при помощи метода имитационного компьютерного моделирования. Сравнение характеристик стойкости к смешанному повреждению возможно только для сопоставимых сетевых структур, имеющих в своем составе одинаковое количество узлов, линейных элементов и потребителей целевого продукта. Кроме того, одинаковой должна быть и используемая циклограмма процесса смешанного повреждения.

Ключевые слова: трубопровод; система; структура; повреждение; сеть; авария; стойкость.

Для цитирования: Тарарычкин И.А. Выбор сетевых структур трубопроводных систем стойких к развитию смешанного повреждения // Надежность. 2020. № 2. С. 12-17. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-2-12-17>

Поступила 02.01.2020 г. / После доработки 21.04.2020 г. / К печати 17.06.2020 г.

Системы трубопроводного транспорта используют при доставке потребителям различных веществ, материалов, в том числе и необходимых для поддержания непрерывных производственных процессов [1–7].

Функционирование таких сложных промышленных объектов связано с определенными рисками и возможностью отказа по различным причинам технологических узлов и агрегатов [8–11]. В некоторых случаях переход в состояние неработоспособности линейных элементов (трубопроводов) не приводит к заметному ограничению функциональных возможностей системы из-за наличия избыточных связей и альтернативных путей доставки целевого продукта.

Если же в результате внутренних или внешних воздействий в системе происходит последовательный переход в состояние неработоспособности части структурных элементов, то такое развитие аварийной ситуации может привести к отключению от источника сначала некоторых, а затем и всех потребителей целевого продукта. Случайный переход в состояние неработоспособности некоторой совокупности линейных элементов системы называется прогрессирующим повреждением [12, 13].

Переход в состояние неработоспособности отдельного транспортного узла приводит к тому, что прохождение через него транспортных потоков оказывается невозможным, и такой точечный элемент системы оказывается заблокированным. Последовательная блокировка точечных элементов системы в случайном порядке называется в дальнейшем прогрессирующей блокировкой [14, 15].

Если при развитии аварийной ситуации одновременно протекают как процессы прогрессирующего повреждения линейных элементов, так и блокировки транспортных узлов, то такая схема воздействия на систему рассматривается как смешанное повреждение.

Развитие смешанного повреждения связано с быстрой деградацией транспортных возможностей системы, однако, в технической литературе отсутствуют данные о закономерностях этого процесса, а также о методах оценки способности систем противостоять его развитию.

Целью настоящей работы является разработка критериев оценки стойкости трубопроводных транспортных систем к смешанному повреждению, а также методов решения типовых задач синтеза сетевых структур стойких к развитию этого процесса.

Смешанное повреждение характеризуется циклограммой $T(\alpha, \beta)$. Параметры α и β указывают количество последовательно повреждаемых линейных элементов и блокируемых транспортных узлов в течение одного цикла воздействия на систему. При заданной циклограмме смешанного повреждения для каждого момента системного времени можно однозначно указать количество работоспособных структурных элементов анализируемого сетевого объекта.

С использованием метода имитационного компьютерного моделирования [16, 17] определялись следующие характеристики стойкости анализируемого сетевого объекта:

1. Средняя доля линейных элементов системы ϕ_{EL} , повреждение которых приводит к разрыву связи источника со всеми потребителями целевого продукта.

2. Средняя доля транспортных узлов ϕ_{UZ} , при блокировке которых в условиях смешанного повреждения происходит разрыв связей источника со всеми потребителями целевого продукта.

Все необходимые расчеты выполнялись при помощи вычислительной системы MathCAD [18, 19]. Перечисленные характеристики следует рассматривать, как проекции на координатные оси вектора $\vec{\Phi}^*$, позволяющего оценить способность системы противостоять развитию смешанного повреждения.

Модуль этого вектора $|\vec{\Phi}^*| = \sqrt{\phi_{EL}^2 + \phi_{UZ}^2}$ характеризует в целом стойкость анализируемой сетевой структуры [20]. Чем больше значение $|\vec{\Phi}^*|$, тем большей стойкостью к смешанному повреждению обладает рассматриваемый объект. С практической точки зрения ценность указанных характеристик заключается в том, что они позволяют выполнять сравнительный анализ стойкости различных сетевых объектов.

Однако корректное сравнение значений ϕ_{EL} , ϕ_{UZ} и $|\vec{\Phi}^*|$ возможно только в отношении сопоставимых структур. Для этого они должны иметь в своем составе одинаковое количество:

- линейных элементов;
- транспортных узлов;
- потребителей целевого продукта.

Кроме того, условия повреждения анализируемых сетевых структур должны быть подобными, т.е. описываться одной циклограммой повреждения $T(\alpha, \beta)$.

По результатам проведенной серии вычислительных экспериментов установлено, что соотношение показателей стойкости совокупности сопоставимых сетевых структур не зависит от принятой циклограммы повреждения, а определяется имеющимся набором внутрисистемных связей. Это означает, что для произвольного набора сопоставимых сетевых объектов соотношение их стойкости не зависит от конкретных условий реализации процедуры смешанного повреждения.

Тогда при оценке соотношения стойкости ряда сопоставимых сетевых структур достаточно в условиях тестового воздействия с характеристиками $\alpha = \beta = 1$ определить соответствующие значения $|\vec{\Phi}^*|$. Упорядочение указанных структур с точки зрения их стойкости к смешанному повреждению производится таким образом, что более стойким системам соответствуют и большие значения $|\vec{\Phi}^*|$.

Отметим, что в случае тестового воздействия с циклограммой $T(1,1)$ имеет место последовательное чередование случайного повреждения одного линейного элемента и блокировка одного транспортного узла системы. Именно такая схема воздействия и используется в дальнейшем при сравнительной оценке способности сопоставимых сетевых структур противостоять развитию процесса смешанного повреждения.

Типовые задачи структурного синтеза трубопроводных систем стойких к развитию смешанного повреждения

Изучение особенностей поведения сетевых структур в условиях смешанного повреждения представляет практический интерес. Эти особенности следует учитывать при решении задач структурного анализа и синтеза трубопроводных систем различного уровня сложности и назначения. При этом оценку свойств альтернативных сетевых структур и принятие проектных решений необходимо выполнять с учетом установленных требований по их сопоставимости. Рассмотрим некоторые типовые проектные задачи, а также методы их решения.

Выбор положения источника целевого продукта на заданной сети

Постановка задачи. На заданной структуре сети с известным положением потребителей требуется установить расположение источника целевого продукта, при котором достигается наибольший уровень стойкости системы к смешанному повреждению. Задача структурного синтеза решается в этом случае путем

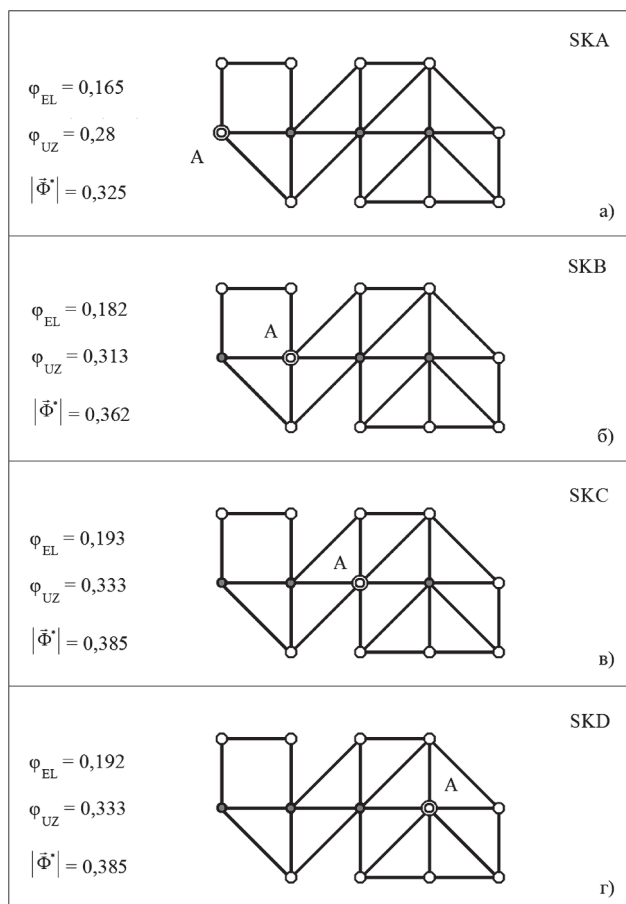


Рис. 1. Структурные схемы трубопроводных систем SKA (а), ..., SKD (г) с различным расположением источника целевого продукта А

сравнения значений $|\bar{\Phi}^*|$ у сетевых объектов с разным расположением источника.

Рассмотрим альтернативные варианты сетевых структур с условным обозначением SKA, ..., SKD, показанные на рис. 1. Они характеризуются разным положением источника А, и содержат по 13 узлов, 23 линейных элемента и 9 потребителей продукта. Каждая из указанных структур при выполнении расчетов подвергалась смешанному повреждению с циклограммой $T(1.1)$.

В этих условиях все перечисленные системы являются сопоставимыми, а сравнение соответствующих значений $|\bar{\Phi}^*|$ оказывается корректным. Результаты расчетов, полученные для выборок объемом 10^4 элементов, приведены на рис. 1.

Видно, что наихудший вариант расположения источника соответствует структурной схеме SKA, а наибольшее значение $|\bar{\Phi}^*|$ наблюдается в случае использования схем SKC и SKD.

При этом стойкость трубопроводных систем построенных на основе структурных схем SKC и SKD оказывается одинаковой. Таким образом, при решении поставленной задачи выбор следует сделать между этими структурными схемами. Окончательное решение в данном случае зависит от дополнительных условий или ограничений, учитывающих, например, возможную стоимость практической реализации каждого из этих двух вариантов.

Выбор расположения в действующей системе новых потребителей целевого продукта

Постановка задачи. В системе с известным расположением источника и нескольких потребителей целевого продукта требуется определить положение дополнительных потребителей, при котором обеспечивается наиболее высокий уровень ее стойкости к смешанному повреждению.

На рис. 2 показаны варианты формирования сетевой структуры с источником А и дополнительными потребителями целевого продукта В, С и D которые планируется включить в состав системы.

Отличия указанных вариантов связаны с различным положением этих потребителей в сети. Необходимо выполнить анализ и принять решение по выбору сетевой структуры с наиболее высоким уровнем стойкости к смешанному повреждению.

Оценим сопоставимость структурных схем, показанных на рис. 2. Все они имеют в своем составе одинаковое количество узлов, линейных элементов и потребителей продукта. В случае смешанного повреждения этих структур с циклограммой $T(1.1)$ соответствующие значения показателей стойкости можно корректно сравнивать между собой.

Установленные в результате имитационного моделирования значения характеристик стойкости для выборок

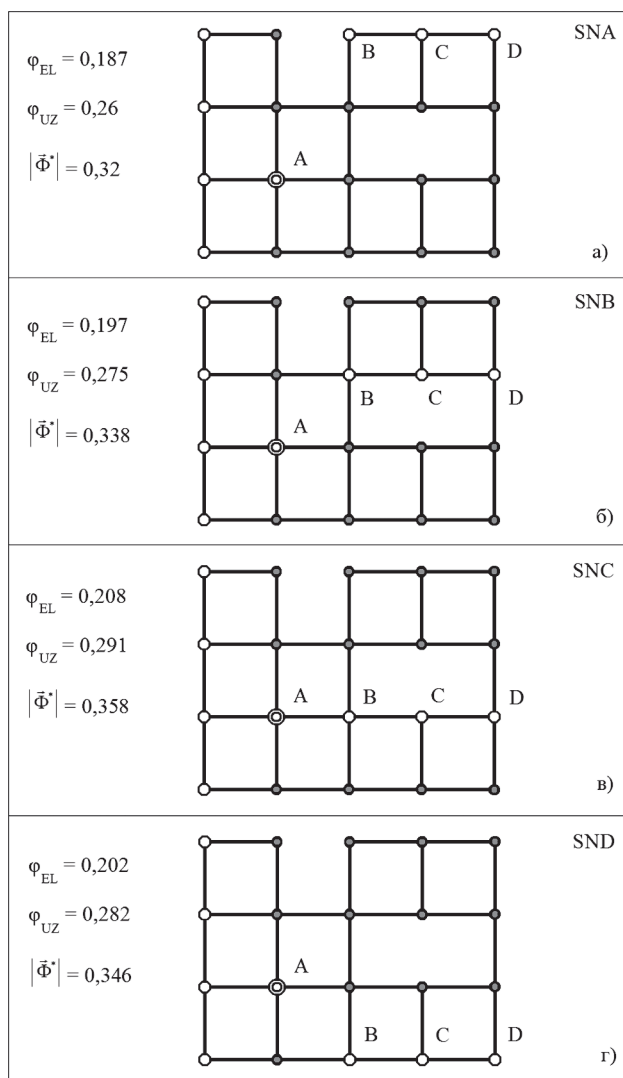


Рис. 2. Структурные схемы трубопроводных систем SNA (а), ..., SND (г) с различным расположением потребителей продукта В, С, D

объемом 10^4 элементов приведены на рис. 2. Видно, что структура с условным обозначением SNC характеризуется наиболее высоким уровнем стойкости к развитию процесса смешанного повреждения. Значение $|\vec{\Phi}^*|$ у такого сетевого объекта превышает соответствующее значение у структуры SNA с наихудшими свойствами примерно в 1,12 раза.

Таким образом, сетевой объект с обозначением SNC и следует рассматривать как результат решения поставленной задачи структурного синтеза.

Выбор места присоединения к действующей системе дополнительного технологического фрагмента

Постановка задачи. Планируемая реконструкция трубопроводной системы связана с расширением ее технологических возможностей и включением дополнительного фрагмента с несколькими потребителями продукта. При этом существует несколько вариантов такого присоединения. Требуется выбрать вариант, при котором достигается наиболее высокий уровень стойкости трубопроводной системы к смешанному повреждению.

Пример структурной схемы трубопроводной системы и соответствующий фрагмент расширения показаны на рис. 3. В составе фрагмента имеются потребители В, ..., G, которые связаны между собой и могут быть присоединены к исходной системе с образованием сетевых структур SFA и SFB (рис. 4).

С точки зрения технологических возможностей вновь образованной системы все указанные варианты присоединения являются равнозначными. Требуется оценить стойкость SFA и SFB к развитию процесса смешанного повреждения, а также выбрать наилучший вариант присоединения к системе фрагмента расширения.

На первом этапе анализа требуется установить, являются ли перечисленные сетевые объекты сопоставимыми. В данном случае ответ будет положительным, поскольку у них совпадает количество узлов, линейных элементов и потребителей целевого продукта. Кроме того, анализируемые объекты в дальнейшем подвергается смешанному повреждению с одинаковой циклограммой $T(1.1)$. Установленные значения $|\vec{\Phi}^*|$ приведены на рис. 4.

Поскольку при выполнении процедуры имитационного моделирования использовались выборки объемом 10^4 элементов, то полученные расчетные значения имеют 2 значащие цифры после запятой. Это означает, что стойкость к смешанному повреждению у сетевых структур

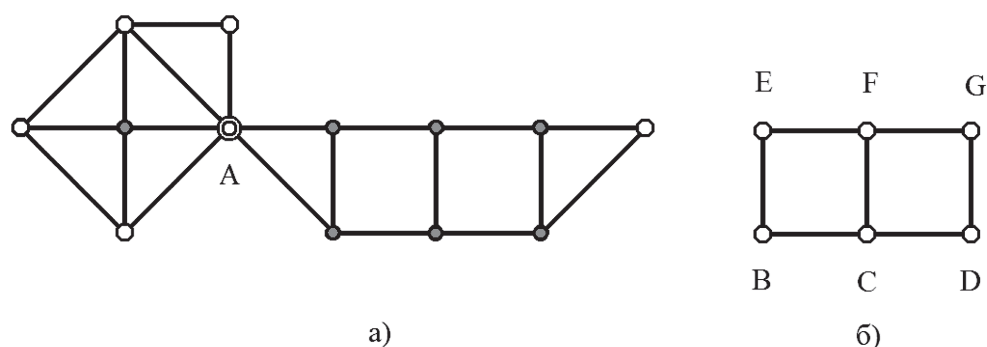


Рис. 3. Структурная схема трубопроводной системы (а) и фрагмент расширения с 6-ю потребителями целевого продукта (б)

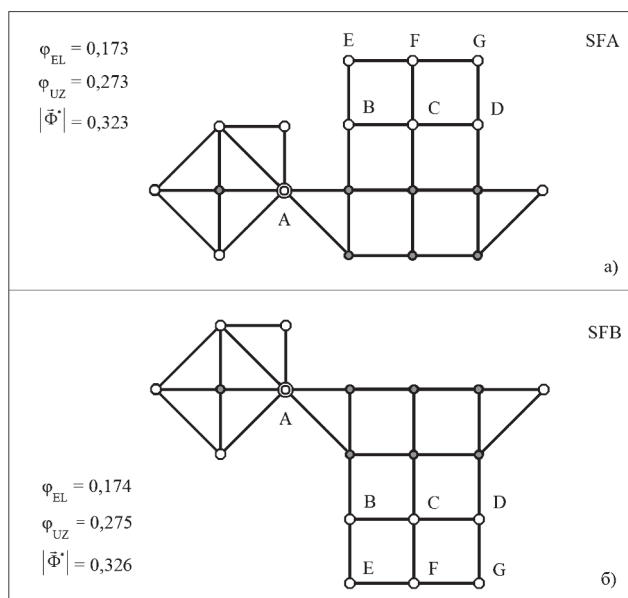


Рис 4. Структурные схемы трубопроводных систем SFA (а) и SFB (б) соответствующие различным вариантам присоединения фрагмента расширения

SFA и SFB оказывается одинаковой. В этих условиях окончательный выбор должен быть сделан с учетом дополнительных критериев, например, по результатам оценки стоимости монтажных работ.

Выбор присоединительных трубопроводов при подключении к транспортной системе фрагмента расширения

Постановка задачи. Реконструкция трубопроводной транспортной системы связана с присоединением фрагмента, в составе которого предусмотрено наличие нескольких потребителей целевого продукта. Для заданного количества дополнительных трубопроводов требуется выбрать места их подсоединения к системе

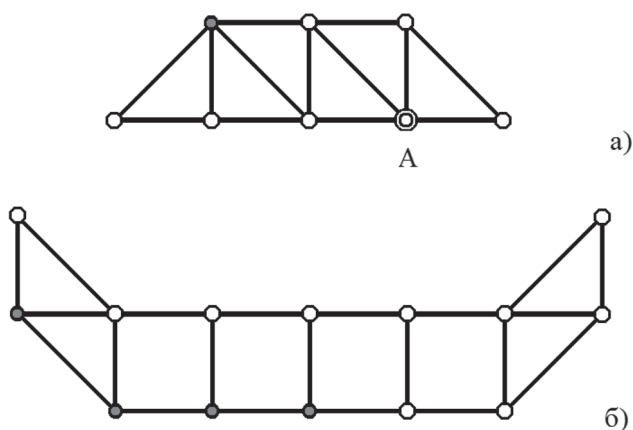


Рис. 5. Структурная схема трубопроводной транспортной системы с источником А и 6-ю потребителями продукта (а), а также схема подключаемого фрагмента расширения с 10-ю потребителями (б)

и фрагменту. Образованная таким образом сетевая структура должна иметь высокий уровень стойкости к развитию процесса смешанного повреждения.

Рассмотрим в этой связи задачу подключения к системе фрагмента расширения, в составе которого имеется 10 потребителей целевого продукта (рис. 5).

Присоединение должно быть выполнено при помощи 4-х дополнительных трубопроводов. На рис. 6 показаны допустимые варианты присоединения, обеспечивающие возможность достижения целей реконструкции. При этом требуется установить, какой из рассмотренных вариантов обеспечивает наибольшую стойкость системы к смешанному повреждению. Оценим сопоставимость сетевых структур SOA, ..., SOD показанных на рис. 6.

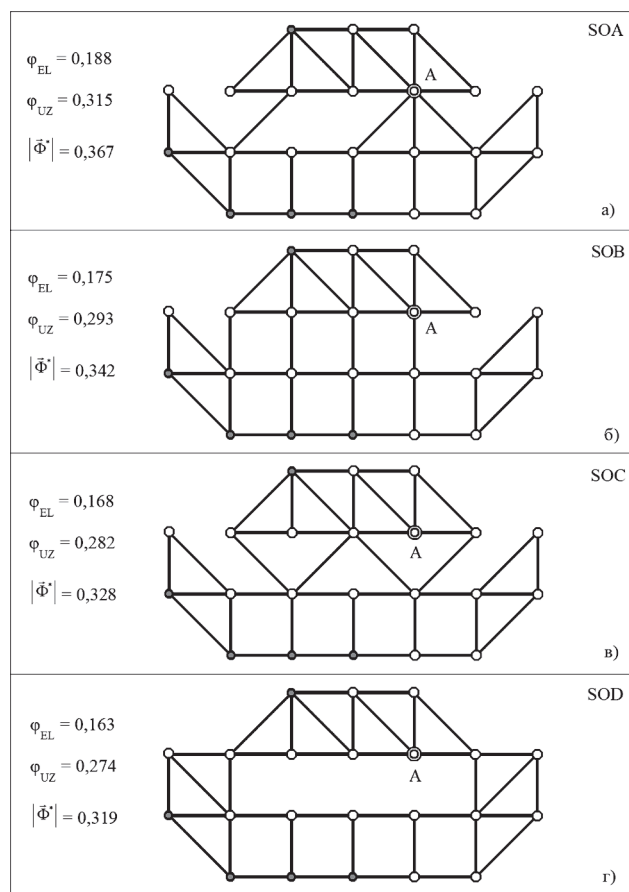


Рис. 6. Структурные схемы трубопроводных систем SOA (а), ..., SOD (г) с различными вариантами расположения присоединительных трубопроводов

Все они содержат одинаковое количество узлов, линейных элементов и потребителей продукта, поэтому в условиях смешанного повреждения с циклограммой T(1.1) соответствующие характеристики стойкости можно корректно сравнивать между собой. Результаты расчетов, полученные для указанных сетевых структур с использованием выборок объемом 10^4 элементов, приведены на рис. 6.

Видно, что наибольшее значение $|\bar{\Phi}^*|$ наблюдается в случае смешанного повреждения сетевой структуры

SOA. При этом для рассмотренных вариантов присоединения наибольшее значение $|\Phi^*|$ превышает наименьшее в 1,15 раза. Таким образом, структурную схему, показанную на рис. 6 (а), и следует рассматривать как решение поставленной задачи синтеза.

Выводы

1. Смешанное повреждение является опасным сценарием развития аварии и сопровождается быстрой деградацией транспортных возможностей трубопроводных систем.

2. Различные сетевые структуры обладают разной способностью противостоять смешанному повреждению, а характеристики их стойкости следует устанавливать при помощи метода имитационного компьютерного моделирования.

3. Сравнение характеристик стойкости к смешанному повреждению Φ_{EL} , Φ_{UZ} , $|\Phi^*|$ возможно только для сопоставимых сетевых структур, имеющих в своем составе одинаковое количество узлов, линейных элементов и потребителей целевого продукта. Кроме того, одинаковой должна быть и используемая циклограмма процесса смешанного повреждения.

Библиографический список

1. Barker G. The Engineer's Guide to Plant Layout and Piping Design for the Oil and Gas Industries. Elsevier Inc., 2018. 510 p.
2. Baron H. The Oil & Gas Engineering Guide: Second Edition. Technip, Paris, 2015. 271 p.
3. Stewart M. Surface Production Operations Facility Piping and Pipeline Systems: Vol. III. Gulf Professional Publishing, Elsevier Inc., 2016. 1108 p.
4. Kleiber M. Process Engineering. Addressing the Gap between Studies and Chemical Industry. Walter de Gruyter GmbH, 2016. 412 p.
5. Ellenberger J.P. Piping and Pipeline Calculations Manual Construction. Design Fabrication and Examination: Second Edition. Butterworth-Heinemann, Elsevier Inc., 2014. 398 p.
6. Mokhtab S, Poe W.A., Speight J.G. Handbook of Natural Gas Transmission and Processing. Gulf Professional Publishing, Elsevier Inc., 2006. 636 p.
7. Sambasivan M., Gopal S. Handbook of Oil and Gas Piping. A Practical and Comprehensive Guide. Taylor & Francis Group, 2019. 147 p.
8. Nolan D.P. Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical, and Related Facilities: Fourth Edition. Gulf Professional Publishing, Elsevier Inc., 2019. 507 p.
9. Singh R. Pipeline Integrity Handbook. Risk Management and Evaluation. Elsevier Inc., 2014. 308 p.
10. Cheng Y.F. Stress Corrosion Cracking of Pipelines. John Wiley & Sons Inc., 2013. 257 p.

11. Jawad M.H. Stress in ASME pressure vessels, boilers, and nuclear components. The American Society of Mechanical Engineers. John Wiley & Sons, Inc., 2018. 334 p.

12. Тарарычкин И.А. Структурный синтез трубопроводных транспортных систем, стойких к повреждениям линейных элементов // Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2017, Вып. 1 (107), с. 96–106.

13. Тарарычкин И.А., Блинов С.П. Имитационное моделирование процесса повреждения сетевых трубопроводных структур // Мир транспорта. 2017. Том 15. № 2. С. 6–19.

14. Тарарычкин И.А., Блинов С.П. Особенности повреждения сетевых структур и развития аварийных ситуаций на объектах трубопроводного транспорта // Безопасность труда в промышленности. 2018. № 3. С. 35–39.

15. Тарарычкин И.А. Стойкость систем трубопроводного транспорта к повреждениям узловых элементов сетевой структуры // Безопасность труда в промышленности. 2018. № 6. С. 63–68.

16. Banks J., Carson J.S., Nelson B.L., et al. Discrete-Event System Simulation: 5 edition. Prentice Hall., 2009. 638 p.

17. Bandyopadhyay S., Bhattacharya R. Discrete and Continuous Simulation. Theory and Practice. CRC Press, 2014. 375 p.

18. Поршнев С.В. Компьютерное моделирование физических процессов с использованием пакета MathCad. М.: Горячая линия, Телеком, 2004. 319 с.

19. Охорзин В.А. Компьютерное моделирование в системе Mathcad: учеб. пособие. М.: Финансы и статистика, 2006. 144 с.

20. Краснов М.Л., Киселев А.И., Макаренко Г.И. и др. Вся высшая математика. Том 1. М.: Едиториал УРСС, 2003. 328 с.

Сведения об авторе

Игорь А. Тарарычкин – доктор технических наук, профессор, Луганский национальный университет им. В.Даля, Украина, Луганск, e-mail: donbass_8888@mail.ru

Вклад автора в статью

Автором проведен анализ особенностей развития процесса смешанного повреждения сетевых структур систем трубопроводного транспорта. Предложено динамику процесса стационарного случайного воздействия на систему описывать при помощи циклограммы повреждения. Установлены характеристики стойкости и условия сопоставимости сетевых структур в условиях смешанного повреждения.

Выполнен сравнительный анализ способности различных сетевых структур противостоять развитию смешанного повреждения при решении типовых проектных задач.

Дискуссия по терминологии надежности

От редакции

На страницах нашего журнала уже не раз публиковались статьи, обсуждающие терминологию в области надежности и ее стандартизацию. Однако эта тема продолжает волновать читателей, и они присылают новые статьи ей посвященные. К сожалению, многие авторы, высказывая разумные с их точки зрения предложения, зачастую не учитывают целый ряд факторов, которые должны быть приняты во внимание при создании общетехнического (межотраслевого) стандарта по надежности. В их числе: требования общих нормативных документов по стандартизации, отечественный и международный опыт стандартизации в данной области, положения других общетехнических стандартов, потребности других отраслей и др. В связи с этим, мы предлагаем заинтересованным специалистам принять участие в дискуссии по проблеме терминологии в надежности. Открывает дискуссию в данном номере журнала статья члена редколлегии В.А. Нетеса, в которой он, опираясь на свой опыт участия в разработке терминологических стандартов по надежности, формулирует общие принципы стандартизации терминологии в области надежности. Редакции представляется целесообразным, прежде чем обсуждать конкретные термины и их определения, действительно сначала договориться о подобных общих принципах и затем обсуждать их специфические применения в конкретных областях науки и практики.

Принципы стандартизации терминологии по надежности

Виктор А. Нетес, Московский технический университет связи и информатики, Российская Федерация, Москва
v.a.netes@mtuci.ru



Виктор А. Нетес

Резюме. Цель. Статья продолжает цикл публикаций, обсуждающих терминологию в области надежности и ее стандартизацию. Ее цель – не рассмотрение и обсуждение конкретных терминов, а формулировка основных принципов, которые должны быть положены в основу при разработке общетехнического терминологического стандарта по надежности. Согласование таких общих принципов позволит облегчить нахождение решений по конкретным терминам и определениям. **Методы.** Общие принципы и требования, установленные в нормативных документах по стандартизации, конкретизированы применительно к терминологическому стандарту по надежности. Также учтены положения ряда других общетехнических стандартов, влияющие на стандартизацию терминологии по надежности. Рассмотрены действующие и прежние терминологические стандарты, как отечественные (ГОСТ 13377–67, ГОСТ 13377–75, ГОСТ 27.002–83, ГОСТ 27.002–89, ГОСТ Р 27.002–2009 и ГОСТ 27.002–2015), так и международные (IEC 60050-191:1990 и IEC 60050-192:2015). Проанализировано, в какой мере они соответствуют общим принципам, указаны недостатки рассмотренных стандартов. **Результаты и выводы.** Сформулированы основные принципы, которым должен соответствовать общетехнический терминологический стандарт по надежности: преемственность по отношению к предшествующим аналогичным отечественным стандартам, близость к международному стандарту МЭК, согласованность с другими базовыми общетехническими стандартами, внутренняя согласованность и логическая непротиворечивость, общность и универсальность для удовлетворения потребностей всех отраслей.

Ключевые слова: надежность, терминология, отечественные и международные стандарты, преемственность, согласованность и непротиворечивость, общность и универсальность.

Для цитирования: Нетес В.А. Принципы стандартизации терминологии по надежности // Надежность. 2020. № 2. С. 19–23. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-2-19-23>

Поступила 30.03.2020 г. / После доработки 18.04.2020 г. / К печати 17.06.2020 г.

Введение

В последние годы стандартизации надежности, в частности, используемой в ней терминологии, был посвящен целый ряд публикаций (в частности, [1–6], еще некоторые статьи будут упомянуты далее). С одной стороны, автора, много лет работающего в этой области и участвовавшего в разработке межгосударственного и международного терминологических стандартов, не может не радовать интерес к этой теме. Однако с другой стороны, это свидетельствует о неблагополучии в данной области [5]. Кроме того, огорчает, что обсуждение порой ходит по кругу, создается впечатление, что некоторые участники дискуссии не читают внимательно то, что было написано по этому поводу ранее, или вообще не знакомы с основными положениями в области стандартизации, установленными нормативными документами.

Эта ситуация инициировала написание данной статьи, основная цель которой не рассмотрение и обсуждение конкретных терминов, а формулировка основных принципов, которые должны быть положены в основу терминологического стандарта по надежности. Автор надеется, что договорившись сначала об общих прин-

ципах, будет легче находить решения по конкретным терминам и определениям.

Конечно, любой стандарт должен соответствовать требованиям, установленным в Федеральном законе «О стандартизации в Российской Федерации» (от 29.06.2015 № 162-ФЗ), в стандартах комплексов «Межгосударственная система стандартизации» (ГОСТ 1.) или «Стандартизация в Российской Федерации» (ГОСТ Р 1.). Порядок разработки стандартов на термины и определения регламентирован рекомендациями [7]. В данной статье эти общие положения будут рассмотрены применительно к терминологическому стандарту по надежности. Изложение будет подкреплено примерами из опыта создания таких стандартов.

Преемственность

Одним из принципов стандартизации, установленным ст. 4 Федерального закона «О стандартизации в Российской Федерации», является обеспечение преемственности деятельности в сфере стандартизации. Первый общетехнический терминологический стандарт по надежности в СССР ГОСТ 13377–67 был принят более полувека назад. Его последовательно сменяли

ГОСТ 13377–75, ГОСТ 27.002–83, ГОСТ 27.002–89, ГОСТ Р 27.002–2009 и ГОСТ 27.002–2015. В этом ряду ГОСТ Р 27.002–2009 стоит особняком (его особенности будут рассмотрены ниже), все же остальные сохраняли преемственность по отношению к своим предшественникам. Конечно, каждый новый стандарт вводил новые термины и уточнял какие-то определения, иначе в его принятии не было бы смысла, но при этом сохранялись некоторые базовые положения.

Для справки в таблице указано количество терминов в каждом из упомянутых стандартов (а также в рассмотренных ниже международных стандартах). Из нее видно, что ГОСТ Р 27.002–2009 и по этому показателю выбивается из общего ряда, причем количество терминов в нем превышает установленную в [7] границу в 200 единиц.

Количество терминов в стандартах

Стандарт	Количество терминов
ГОСТ 13377–67	24
ГОСТ 13377–75	86
ГОСТ 27.002–83	89
ГОСТ 27.002–89	116
ГОСТ Р 27.002–2009	212
ГОСТ 27.002–2015	146
ИЕС 60050-191:1990	244 (учтены только термины, относящиеся к надежности)
ИЕС 60050-192:2015	260

По мнению автора, базовые положения, сохраняемые в отечественных стандартах, таковы:

Определение надежности как *свойства* объекта (изделия – в ГОСТ 13377–67, соотношение между этими понятиями будет рассмотрено ниже).

Рассмотрение надежности в условиях *применения (использования), технического обслуживания и ремонта, хранения и транспортирования объекта*.

Определение надежности как *комплексного свойства*, которое может включать несколько более простых свойств: *безотказность, ремонтпригодность, долговечность и сохраняемость*.

Выделение двух пар противоположных состояний объекта: *исправное – неисправное и работоспособное – неработоспособное*.

Наличие нескольких *комплексных показателей* помимо коэффициента готовности: *коэффициента технического использования, коэффициента оперативной готовности* (с 1975 г.), *коэффициента сохранения эффективности* (с 1983 г.).

Близость к международным стандартам

Одной из целей стандартизации, как указано в Федеральном законе «О стандартизации в Российской Федерации» (ст. 3), является содействие интеграции

Российской Федерации в мировую экономику и международные системы стандартизации в качестве равноправного партнера. В соответствии с [7, п. 3.12] одной из основных задач стандартизации научно-технической терминологии является гармонизация (обеспечение сопоставимости) научно-технической терминологии национального и международного уровней. Поэтому для терминологического обеспечения российской национальной системы стандартизации рекомендуется максимально использовать терминологические стандарты и словари международных организаций (ИСО, МЭК и др.), и этой теме в [7] посвящен специальный раздел 8. Как там указано, применение международных стандартов позволяет реализовать несколько задач. Одна из них – использование достижений научно-технического прогресса. Действительно, большинство современных технологий, технических решений, реализующих их аппаратных и программных средств приходят к нам из-за рубежа. Естественно, что вместе с ними приходят и относящиеся к ним термины. Другая важная задача – стандартизировать терминологию, используемую при торгово-экономическом и научно-техническом сотрудничестве с другими странами.

Кроме того, в настоящее время значительное число наших стандартов гармонизированы с международными. Поэтому даже если при создании терминологического стандарта по надежности никак не учитывать аналогичный международный стандарт, термины и определения из него все равно могут проникать в нашу страну вместе с другими стандартами, что может приводить к нежелательным коллизиям. Характерный пример: в широко используемом российском стандарте [8] термину «надежность» дано такое определение: «способность функционировать как и когда необходимо» (его источник будет указан ниже).

К сожалению, полноценная гармонизация отечественного терминологического стандарта по надежности с международным стандартом в настоящее время вряд ли возможна, поскольку она вступила бы в явное противоречие с принципом преемственности. Дело в том, что стандартизация терминологии по надежности в нашей стране началась раньше, чем в международном масштабе, однако наши представители не принимали активного участия в работе соответствующих международных организаций, наш опыт практически не был учтен, в результате чего отечественные и международные стандарты разошлись по некоторым важным позициям (примеры будут даны ниже). Поэтому следует, с одной стороны, постепенно двигаться в сторону приближения отечественной терминологии к международной, а с другой, – пытаться включать в международный стандарт отсутствующие в нем термины из нашего стандарта.

Ведущую роль в стандартизации надежности в мире играет МЭК, точнее, его технический комитет (ТК) 56, который так и называется «Надежность» (“Dependability”). По соглашению с ИСО он является горизонтальным, т.е. разрабатывает стандарты по надежности не только для

электротехники, а для всех областей техники. Интересующихся его историей и деятельностью можно адресовать к статьям [9] и [10] (автор первой из них был председателем ТК 56 в 2008–2017 годах, автор второй – нынешний председатель); на русском языке имеется публикация [11], отражающая опыт работы в ТК 56 ее авторов.

Действующий международный терминологический стандарт по надежности [12] представляет собой часть № 192 Международного электротехнического словаря (International Electrotechnical Vocabulary, IECV). IECV содержит все стандартизированные МЭК термины и их определения на английском и французском языках. Он имеет общедоступную онлайн-версию «Электропедия» (<http://www.electropedia.org/>), в которой приведены также эквиваленты терминов на других языках. В частности, термины по надежности даны еще на 9 языках (помимо английского и французского), к сожалению, русского среди них нет. Обзор стандарта [12] на русском языке, его сравнение с предшествующей версией подобного стандарта [13] и отечественным терминологическим стандартом имеется в [14].

Ни одно из указанных выше базовых положений отечественных стандартов не согласуется в полной мере с международными стандартами. В них надежность и ее составляющие (безотказность, ремонтпригодность и пр.) определяются не как свойства, а как способности объекта; не учитывается хранение и транспортирование объекта, в результате чего в состав надежности не включается сохраняемость; отсутствуют аналоги исправного и неисправного состояний, отсутствуют указанные выше комплексные показатели надежности. Впрочем, что касается соотношения между свойством и способностью, то, по мнению автора, разница между ними не столь велика [2], да и в самом ТК 56 МЭК, определяя надежность как способность (ability) объекта, говорят о ней как о свойстве (property) [9].

Именно [12] являлся источником приведенного выше определения надежности из [8]. Дело в том, что стандарт [8] идентичен ISO 9000:2015, а при разработке этого международного стандарта, учитывая ведущую роль МЭК в стандартизации надежности, было взято определение из [12]. Кстати, хотелось бы, чтобы таким же образом действовали и разработчики наших стандартов, т.е. чтобы они не придумывали свои термины и определения, относящиеся к надежности, а брали их из терминологического стандарта системы стандартов «Надежность в технике».

Первой попыткой найти компромисс между преемственностью и приближением к международному стандарту стал ГОСТ Р 27.002–2009, который был разработан с учетом основных нормативных положений международного стандарта [13]. К сожалению, эта попытка оказалась неудачной, поскольку ГОСТ Р 27.002–2009 имел целый ряд существенных недостатков.

В нем была плохо продумана система терминов, которая оказалась несогласованной. Например, в определении надежности, взятом из [13], был использован

термин «поддержка технического обслуживания», однако сам он включен в стандарт не был. С другой стороны, как и в предшествующих наших стандартах, в ГОСТ Р 27.002–2009 был термин «сохраняемость», однако связь этого понятия с надежностью оказалась совершенно непонятной. Какие-то термины (например, «неисправность») приобрели смысл, отличающийся от того, который был закреплён предшествующими отечественными стандартами и стал для специалистов привычным. Для ряда терминов, взятых из [13], были выбраны неудачные русские эквиваленты. Перевод некоторых определений из [13] был сделан с ошибками (пропуск слов, использование не тех падежей и т.п.), из-за чего их смысл оказался искажен или плохо понятен. Как уже было отмечено выше, количество терминов в нем было слишком велико. Кроме того, взятый за основу стандарт [13] к тому времени уже устарел, и в ТК 56 МЭК активно шла работа над новым стандартом, который должен был его заменить (к сожалению, эта работа заняла больше времени, чем первоначально планировалось, и [12] был принят только в 2015 г.).

ГОСТ Р 27.002–2009 подвергся серьезной критике со стороны научно-технической общественности, в результате чего Росстандарт принял решение действие ГОСТ Р 27.002–2009 приостановить и восстановить действие межгосударственного ГОСТ 27.002–89 (приказ от 29.11.2012 № 1843-ст). Одновременно с этим началась разработка нового терминологического стандарта, которым стал межгосударственный ГОСТ 27.002–2015. К сожалению, Росстандарт, вводя в действие этот стандарт в качестве национального стандарта РФ (приказ от 21.06.2016 № 654-ст), не отменил противоречащий ему ГОСТ Р 27.002–2009, как это должно было быть сделано в соответствии с п. 6.2 ГОСТ Р 1.8–2011 [14].

При разработке ГОСТ 27.002–2015 была сделана новая попытка найти компромисс между преемственностью и приближением к новому стандарту МЭК [12], однако в отличие от предыдущего раза в этом случае приоритет был отдан преемственности. В то же время в него были включены некоторые термины из [12], ранее отсутствовавшие в наших стандартах.

Согласованность с другими общетехническими стандартами

Еще один принцип стандартизации, установленный Федеральным законом «О стандартизации в Российской Федерации», – это непротиворечивость национальных стандартов друг другу. Действительно, противоречия между стандартами ставят в затруднительное положение тех, кто применяет стандарты («чему верить?» [5]), подрывают доверие и уважение ко всей системе стандартизации. Поэтому терминологический стандарт по надежности должен быть согласован с базовыми общетехническими стандартами, к числу которых относятся, в частности, стандарты ЕСКД (ГОСТ 2.), ЕСТД (ГОСТ 3.) и т.п.

Казалось бы, это требование является очевидным и должно быть понятно всем. К сожалению, на практике были случаи, когда этот принцип нарушался. Например, в ГОСТ Р 27.002–2009 определение термина «изделие» принципиально отличалось от определения этого же термина в ЕСКД (более подробно это было рассмотрено в [16]).

Определение надежности как свойства согласуется с данным принципом. Действительно, общетехнический стандарт [17] определяет качество продукции как совокупность свойств продукции, обуславливающих ее пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с ее назначением. Одним из этих свойств является надежность.

Следует отметить, что согласование стандартов должно быть двусторонним. Общие термины, используемые в стандартах по надежности, должны иметь тот же смысл, что и в базовых общетехнических стандартах, в которых имеются эти термины. С другой стороны, термины по надежности во всех стандартах должны использоваться в соответствии с тем, как они определены в терминологическом стандарте системы стандартов «Надежность в технике».

Внутренняя согласованность и непротиворечивость

Еще более очевидным требованием является внутренняя согласованность и непротиворечивость самого стандарта. К сожалению, бывало, что и этот принцип нарушался. Например, в ГОСТ Р 27.002–2009 термины «состояние готовности» и «время готовности» не имели никакого отношения к показателям готовности (коэффициенту готовности и пр.); работоспособное и неработоспособное состояния не были противоположными друг другу, а противоположным неработоспособному оказалось «дежурное состояние».

Есть некоторая логическая нестыковка и в [12], наличие которой признают сами его разработчики [9]. Надежность определяется там как способность (свойство) объекта, однако она включает обеспеченность технического обслуживания и ремонта (maintenance support performance), которая определяется как эффективность организации в отношении поддержки технического обслуживания и ремонта, т.е. является не свойством объекта, а скорее условиями, при которых он используется.

Общность и универсальность

То обстоятельство, что стандарт по надежности должен быть общетехническим, требует максимальной общности и универсальности устанавливаемых в нем терминов и их определений. Они должны быть такими, чтобы их можно было применять во всех отраслях. В соответствии с [7, п. 6.3] признаки, вводимые в определение, должны быть присущи всем объектам, составляющим объем понятия.

Конечно, при использовании в различных отраслях может возникнуть необходимость конкретизации и уточнения. Поэтому в начале всех последних стандартов (начиная с 1989 года) сказано, что приведенные в них определения можно при необходимости изменять, вводя в них производные признаки, раскрывая значение используемых в них терминов, указывая объекты, входящие в объем определяемого понятия. Однако эти изменения не должны нарушать объем и содержание понятий, определенных в стандарте.

С этой точки зрения посмотрим на то, к чему относится понятие «надежность», т.е. свойством или способностью чего она является. В ГОСТ 13377–67 и ГОСТ Р 27.002–2009 для этого использовался термин «изделие», во всех остальных наших стандартах – «объект». Содержание этих понятий и соотношение между ними были детально проанализированы в [16], поэтому здесь этот вопрос будет рассмотрен кратко.

Характерно, что в ГОСТ 13377–67 и ГОСТ Р 27.002–2009 были приведены достаточно общие определения изделия, в первом из них – в преамбуле, во втором – как одного из основных терминов. Однако они отличались от определения этого понятия в ЕСКД, и поэтому не удовлетворяли принципу согласованности. Поэтому бывали случаи, когда представители некоторых отраслей, имевшие дело со зданиями и сооружениями, энергосистемами, сетями связи и т.п., заявляли, что стандарт к ним не относится, поскольку их объекты не являются изделиями. При этом они понимали изделие в привычном для них смысле, т.е. в соответствии с определением ЕСКД.

Поэтому во всех остальных наших стандартах определение надежности и других терминов дается применительно к объекту. Кстати, в «Электропедии» среди языков, на которых дана терминология по надежности, есть два славянских: чешский и польский, в них для данного понятия использованы термины objekt и obiect соответственно. Вместе с тем, поскольку изделие является частным случаем объекта, никто не запрещает в отраслевых документах писать о надежности или отказах изделий, если рассмотрение ограничивается ими.

Определение термина «надежность» также должно быть максимально общим и универсальным. Различные подходы к формулировке такого определения были детально проанализированы в [2]. В частности, там было проведено сравнение двух определений: параметрического и функционального. При этом отмечено, что функциональное определение является более общим, т.е. оно годится для более широкого круга ситуаций. Возможность ситуаций, когда параметрическое определение нецелесообразно или невозможно, отмечалось еще в ГОСТ 27.002–89 в пояснении к термину «надежность», однако там как основное было взято параметрическое определение, а функциональное было приведено в указанном пояснении. Таким образом, принцип общности был в этом случае нарушен: в определение упоминались параметры, присущие

не всем объектам. Разработчики ГОСТ 27.002–2015 решили следовать этому принципу, поэтому выбрали в качестве основного функциональное определение, а параметрическое привели в одном из примечаний к термину «надежность». Такой выбор был также шагом в приближении к [12] (определение надежности из него было приведено выше).

При обсуждении данного аспекта нередко приходится сталкиваться с позицией, которую можно назвать «отраслевым эгоцентризмом». При этом участвующие в обсуждении специалисты требуют, чтобы в стандарт вошли термины и определения, которые используются именно в их отрасли, не воспринимая возражения представителей других отраслей, для которых такие формулировки не подходят, отказываются идти на компромисс и искать взаимоприемлемые универсальные решения. Вообще, о важности компромиссов в стандартизации (и не только в ней) хорошо было написано в [18].

Заключение

В статье сформулированы основные принципы, которым должен соответствовать общетехнический терминологический стандарт по надежности: преемственность по отношению к предшествующим аналогичным отечественным стандартам, близость к международному стандарту МЭК, согласованность с другими базовыми общетехническими стандартами, внутренняя согласованность и логическая непротиворечивость, общность и универсальность для удовлетворения потребностей всех отраслей.

Автор обращается с призывом ко всем заинтересованным специалистам высказать свое мнение и дать конструктивные предложения по этим принципам.

Библиографический список

1. Нетес В.А., Тарасьев Ю.И., Шпер В.Л. Актуальные вопросы стандартизации терминологии в области надежности // Надежность. 2014. № 2. С. 116–119.
2. Нетес В.А., Тарасьев Ю.И., Шпер В.Л. Как нам определить что такое «надежность» // Надежность. 2014. № 4. С. 3–14.
3. Алпеев А.С. Терминология надежности // Надежность. 2016. Т. 16. № 4. С. 43–45.
4. Похабов Ю.П. О дефиниции термина «надежность» // Надежность. 2017. Т. 17. № 1. С. 4–10.
5. Ершов Г.А., Семериков В.Н., Семериков Н.В. Чему верить? О системе стандартов «Надежность в технике» // Стандарты и качество. 2018. № 8. С. 27–31.
6. Нетес В.А. Как вернуть доверие? О системе стандартов «Надежность в технике» // Стандарты и качество. 2019. № 2. С. 19–24.

7. Р 50.1.075–2011. Разработка стандартов на термины и определения. М.: Стандартинформ, 2012. III, 19 с.

8. ГОСТ Р ИСО 9000-2015. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. М.: Стандартинформ, 2015. IV, 48 с.

9. Loll V. Short History of IEC TC56 from 1965 to 2017 // 6th Workshop on Open Systems Dependability. Tokyo, 2017-10-21. P. 25–29.

10. Van Hardeveld T. Developments in Dependability Standardization // 6th Workshop on Open Systems Dependability. Tokyo, 2017-10-21. P. 30–34.

11. Богданова Г.А., Нетес В.А. МЭК/ТК 56: стандартизация для надежности // Методы менеджмента качества. 2009. № 5. С. 44–47.

12. IEC 60050-192:2015. International electrotechnical vocabulary – Part 192: Dependability.

13. IEC 60050-191:1990. International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 191: Dependability and quality of service.

14. Нетес В.А. Новый международный терминологический стандарт по надежности // Надежность. 2016. № 3. С. 54–58.

15. ГОСТ Р 1.8–2011. Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты межгосударственные. Правила проведения в Российской Федерации работ по разработке, применению, обновлению и прекращению применения. М.: Стандартинформ, 2012. III, 18 с.

16. Нетес В.А. Объект в надежности: определение и содержание понятия // Надежность. 2019. Т. 19. № 4. С. 3–7.

17. ГОСТ 15467–79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2009. 20 с.

18. Аронов И.З. Искусство компромисса // Методы менеджмента качества. 2012. № 6. С. 1.

Сведения об авторе

Виктор А. Нетес – доктор технических наук, профессор кафедры «Сети связи и системы коммутации» Московского технического университета связи и информатики, Российская Федерация, Москва, e-mail: v.a.netes@mtuci.ru

Вклад автора в статью

Нетес В.А. провел анализ отечественных и международных терминологических стандартов по надежности и предложений по их совершенствованию, выявил присущие им недостатки и отступления от требований нормативных документов по стандартизации, сформулировал общие принципы, которым должен соответствовать общетехнический терминологический стандарт по надежности.

О терминах надежности

Виктор С. Михайлов, Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики им. Д.И. Менделеева», Российская Федерация, Москва
Mvs1956@list.ru



Виктор С.
Михайлов

Резюме. Цель. В настоящее время сформировалась полноценная структура национальных, российских стандартов по надежности ГОСТ Р 27.xxx. Однако из-за приостановления действия стандарта по терминологии (ГОСТ Р 27.002-2009) эта структура оказалась неполноценной. В этой ситуации компромиссным решением может оказаться двойное наименование у действующего стандарта по надежности в России. Целью статьи является формирование предложений по совершенствованию основных понятий в области надежности. **Методы.** В работе применяются методы системного анализа в области терминологии надежности. В последнее десятилетие активно ведется дискуссия о терминах в надежности. Затрагивают не только частные определения, но непосредственно определение термина «надежность». Терминология по надежности в Российской Федерации представлена в настоящее время двумя стандартами: российским стандартом ГОСТ Р 27.002-2009 (приостановлен на неопределенное время) и межгосударственным стандартом ГОСТ 27.002-2015. В данной работе ведется продолжение полемики по ограниченному кругу понятий и терминов, наиболее интересных для автора. Затрагиваются понятия: объект, изделие, отказ, свойство, способность, расчет, оценка, прогнозирование, требования к надежности. Отмечено, что в основе понятия технического изделия лежит продукт – предмет исследования как законченный результат некоторой технической деятельности: сделать и одновременно наделить продукт способностью, необходимой для выполнения тех или иных функций. Показано, что признаки изделия характеризуют его способности, поэтому при определении надежности первична способность изделия, наделенного свойствами (признаками), необходимыми для выполнения тех или иных функций. Сами признаки (свойства) являются первичными лишь при определении требуемой способности изделия и являются вторичными при определении надежности. Обосновано, что нет надобности подменять два понятия «расчет» и «оценка», что соответствует истине. Отмечена корректность определения термина «прогнозирование» в российском стандарте ГОСТ Р 27.002-2009: вычислительный процесс, направленный на предсказание значений количественных характеристик. **Выводы.** На основании проведенного в работе терминологического анализа сформированы следующие предложения. В термины по надежности следует ввести определение изделия. Под изделием следует понимать функциональную единицу, наделенную способностями, определяемыми необходимыми свойствами. Под отказом следует понимать событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния изделия. Понятие объекта следует изложить в редакции ГОСТ Р 27.001-2009: объект (изделие, система, комплекс), который рассматривают отдельно с позиции надежности, состоящий из технических и программных средств, или их сочетания. Термины надежность, безотказность, долговечность и подобное следует определять как установленную способность изделия выполнять требуемую функцию в заданных обстоятельствах. Термин «требования к надежности» следует закрепить в стандартах по надежности. Не следует в межгосударственном стандарте ГОСТ 27.002-2015 вводить термин «оценка надежности».

Ключевые слова: объект; изделие; отказ; свойство; способность; расчет; оценка; прогнозирование, требования к надежности.

Для цитирования: Михайлов В.С. О терминах надежности // Надежность. 2020. № 2. С. 24-27. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-2-24-27>

Поступила 21.12.2019 г. / После доработки 16.04.2020 г. / К печати 17.06.2020 г.

Введение

В последнее десятилетие активно ведется дискуссия о терминах в надежности [1–6]. Затрагивают не только частные определения, но непосредственно определение термина «надежность» [1–6]. В силу того, что российский стандарт ГОСТ Р 27.002-2009 [7] приостановлен на неопределенное время, терминология по надежности в Российской Федерации представлена в настоящее время межгосударственным стандартом ГОСТ 27.002-2015 [8]. ГОСТ 27.002-2015 принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 28 декабря 2015 г. №83-П). За принятие проголосовали: Армения, Казахстан, Киргизия, Молдова и Российская Федерация (РФ). Среди проголосовавших отсутствует Беларусь, которая является основателем Таможенного Союза.

В данной работе ведется продолжение полемики по ограниченному кругу терминов, наиболее интересных для автора.

ГОСТ 27.002-2015 или ГОСТ Р 27.002?

В настоящее время сформировалась полноценная структура национальных, российских стандартов по надежности ГОСТ Р 27.xxx. Однако из-за приостановления действия стандарта по терминологии (ГОСТ Р 27.002-2009) эта структура оказалась неполноценной. В этой ситуации компромиссным решением может оказаться двойное наименование у действующего стандарта по надежности в России. В том случае, когда стандарт применяют внутри РФ, стандарт имеет наименование ГОСТ Р 27.002-2015, а в случае межгосударственных отношений стандарт имеет наименование ГОСТ 27.002-2015. На период приостановки действия национального стандарта по надежности ГОСТ Р 27.002-2009 такое решение помогло бы избавиться от множества вопросов.

Объект, изделие и отказ

В основе понятия технического **изделия** (далее – изделия) лежит продукт – предмет исследования как законченный результат некоторой технической деятельности: сделать и одновременно наделить продукт способностью, необходимой для выполнения тех или иных функций. Например: микроскоп наделен большой разрешающей способностью, диод способен выдерживать большое обратное напряжение, прибор способен выравнять напряжение, поверхность с большой отражательной способностью. Поэтому под изделием следует понимать функциональную единицу из произведенного множества продуктов, наделенную требуемыми способностями, определяемыми необходимыми свойствами. Что согласуется с определением изделия по ГОСТ Р 27.002-2009 [7].

В соответствии с п.49 ГОСТ Р 27.002-2009, **отказ**: потеря способности изделия выполнить требуемую

функцию. А в примечании к п.49 – «отказ является событием, которое приводит к состоянию неисправности». С другой стороны, в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 27.002-2015, **отказ**: «событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния **объекта**». Учитывая, что неисправность не всегда приводит к отказу (например: небольшие сколы и вмятины на поверхности оборудования, разбитый колпак сигнального фонаря и т. д.), то определение в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 27.002-2015 предпочтительней. Определение понятия «объект» в ГОСТ Р 27.002-2009 не приводится. Поясним, в чем заключается понятие объект.

Н.Е. Яценко: «Объект – 1. В философии – всякое явление, существующее независимо от человеческого сознания. 2. В широком смысле – предмет, явление, которые человек стремится познать и на которые направлена его деятельность». «Предмет – 1. Всякое материальное явление, вещь. 2. То, на что направлена мысль, действие или чувство» [9].

Объект – это процесс или явление, порождающее проблемную ситуацию и взятое исследователем для изучения. Предмет – это то, что находится в рамках, в границах объекта. Объект – это та часть научного знания, с которой исследователь имеет дело. Предмет исследования – это тот аспект проблемы, исследуя который мы познаем целостный объект, выделяя его главные, наиболее существенные признаки. Объект и предмет исследования как научные категории соотносятся как общее и частное [9].

В надежности исследуется качество объекта или, в конечном итоге, свойства предмета – качество, признак, составляющий отличительную особенность объекта познания. Поэтому в терминах по надежности следует ввести понятие «**изделие**» как предмет исследования, как частное и конкретное.

В ГОСТ 27.002-2015 вводится определение понятия «технический объект»: «Предмет рассмотрения, на который распространяется терминология по надежности в технике». Такое определение объекта не соответствует общепризнанному и порождает вопросы, а именно:

- в каком объеме должна распространяться терминология по надежности в технике;

- если не в полной мере, то в какой частности.

Наиболее удачное понятие объекта приведено в ГОСТ Р 27.001-2009 [10]: объект (изделие, система, комплекс), который рассматривают отдельно с позиции надежности, состоящий из технических и программных средств, или их сочетания.

Разработчик должен самостоятельно выбрать, каким термином пользоваться: объект или изделие, исходя из потребности в терминологии.

О термине «требования надежности»

Несмотря на устоявшийся термин «требования к надежности» [11], приходится очень часто встречать употребление термина «требования надежности» [12].

В соответствии с [11] характеристики надежности (требования к надежности) могут быть установлены (выдвинуты) поставщиком или потребителем. Однако исходя из термина «требования надежности» следует, что требования к надежности изделия выдвигает само изделие, что является нонсенсом. Поставщик, устанавливая требования к надежности в виде закладываемых качеств (свойств, показателей) в конструкцию изделия, в итоге вправе ожидать от изделия необходимых способностей выполнять определенные функции. Поэтому понятие и термин «требования к надежности» следует установить в разделе, относящемся к разработке.

Свойство или способность

Свойство – качество, признак [13, 14], составляющий отличительную особенность объекта познания [9]. Признаки изделия характеризуют его способности, поэтому при определении надежности первична **способность** изделия, наделенного свойствами (признаками), необходимыми для выполнения тех или иных функций. Сами признаки (свойства) являются первичными лишь при определении требуемой способности изделия и являются вторичными при определении надежности. Поэтому термины надежность, безотказность, долговечность и тому подобное следует определять как **способность** изделия выполнять требуемую функцию в заданных обстоятельствах, что соответствует стандарту ГОСТ Р 27.002-2009. Следует заметить, что межгосударственный стандарт ГОСТ 27.002-2015 термины надежность, безотказность, долговечность и тому подобное определяет как **свойство объекта**, что является неверным подходом из-за вторичности в иерархии определений. Приведем примеры построения некоторых определений способностей.

Безотказность – установленная способность изделия непрерывно выполнять требуемую функцию в заданном интервале времени (наработки) при данных условиях. Эта способность определяется свойствами изделия, которые характеризуются следующими показателями: среднее время между отказами, средняя наработка до отказа, вероятность безотказной работы, гамма-процентная наработка до отказа, гамма-процентная наработка между отказами, интенсивность отказов, параметр потока отказов.

Готовность – установленная способность изделия выполнять требуемую функцию при данных условиях в предположении, что необходимые внешние ресурсы обеспечены. Эта способность определяется свойствами изделия, которые характеризуются комплексными показателями готовности.

Долговечность – установленная способность изделия выполнять требуемую функцию до достижения предельного состояния при данных условиях использования и технического обслуживания. Эта способность определяется свойствами изделия, которые характеризуются следующими показателями: средний ресурс, гамма-

процентный ресурс, средний срок службы, гамма-процентный срок службы.

Надежность – способность изделия выполнять требуемую функцию в заданных обстоятельствах. Способность изделия определяется частными способностями: готовность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость.

Подобное можно продолжить. Тем самым показана следующая последовательность иерархической структуры: надежность, способность, свойство, показатель.

Расчет, оценка и прогнозирование

Понятие «оценка надежности», введенное в межгосударственном стандарте ГОСТ 27.002-2015 как определение численных значений показателей надежности объекта, является емким понятием и требует дополнительных пояснений в стандарте. Оценка надежности подразумевает, что определение численных значений показателей надежности проводится либо **расчетом** на основании справочных данных, либо **оценкой** по результатам испытаний, где под оценкой понимают статистическое оценивание. В соответствии с ГОСТ Р 50779.10-2000, статистической оценкой (слово «статистической» всегда опускают) понимается статистика, используемая для оценивания параметра совокупности. Статистика – функция от выборочных значений [13]. Параметр совокупности – некоторый показатель надежности. Так как в теории надежности слово «оценка» зарезервировано за статистической оценкой, то не следует в межгосударственном стандарте ГОСТ 27.002-2015 вводить термин «оценка надежности» или «оценивание надежности». В крайнем случае, следует ввести термин «Определение количественных величин показателей надежности» – определение численных значений показателей надежности расчетом на основании справочных данных или оценкой по результатам испытаний. В российском стандарте ГОСТ Р 27.002-2009 термин «оценка надежности» отсутствует, т.к. нет надобности подменять два понятия «расчет» и «оценка», что соответствует истине.

В российском стандарте ГОСТ Р 27.002-2009 дается корректное определение «**прогнозирования**» – вычислительный процесс, направленный на предсказание значений количественных характеристик. Понятие «**прогнозирование** надежности», введенное в межгосударственном стандарте ГОСТ 27.002-2015 как предварительная **оценка** надежности объекта на основании предшествующего опыта или статистики, в силу вышесказанного следует откорректировать в соответствии с российским стандартом ГОСТ Р 27.002-2009.

Выводы

1. В термины по надежности следует ввести определение изделия.

2. Под изделием следует понимать функциональную единицу, наделенную способностями, определяемыми необходимыми свойствами.

3. Под отказом следует понимать событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния изделия.

4. Понятие объекта следует изложить в редакции ГОСТ Р 27.001-2009: объект (изделие, система, комплекс), который рассматривают отдельно с позиции надежности, состоящий из технических и программных средств, или их сочетания

5. Термины надежность, безотказность, долговечность и подобное следует определять как установленную способность изделия выполнять требуемую функцию в заданных обстоятельствах.

6. Термин «требования к надежности» следует закрепить в стандартах по надежности.

7. Не следует в межгосударственном стандарте ГОСТ 27.002-2015 вводить термин «оценка надежности».

Библиографический список

1. Нетес В.А., Тарасьев Ю.И., Шпер В.Л. Актуальные вопросы стандартизации терминологии в области надежности // Надежность. 2014. № 2. С. 116–123.
2. Нетес В.А., Тарасьев Ю.И., Шпер В.Л. Как нам определить, что такое «Надежность» // Надежность. 2014. № 4. С. 3–25.
3. Нетес В.А. Новый международный терминологический словарь по надежности // Надежность. № 3. 2016. С. 54 – 58.
4. Алпеев А.С. Терминология надежности // Надежность 2016. № 4. С. 43–45.
5. Похабов Ю.П. О дифиниции термина «Надежность» // Надежность. 2017. № 1. С. 4–10.
6. Нетес В.А. Объект в надежности: определение и содержание понятия // Надежность. 2019. № 4(19). С. 3–7.
7. ГОСТ Р 27.002-2009. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2011. 27 с.
8. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 23 с.
9. Яценко Н.Е. Толковый словарь обществоведческих терминов. СПб., 1999. С. 280, 330.

10. ГОСТ Р 27.001-2009. Надежность в технике. Система управления надежностью. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2010. 9 с.

11. ГОСТ Р 27.003-2011. Надежность в технике. Управление надежностью. Руководство по заданию технических требований к надежности. М.: Стандартинформ, 2013. 16 с.

12. ГОСТ Р 56526-2015. Требования надежности и безопасности космических систем, комплексов и автоматических аппаратов единичного (мелкосерийного) изготовления с длительными сроками активного существования. М.: Стандартинформ, 2016. 45 с.

13. ГОСТ Р 50779.10-2000. Статистические методы. Вероятность и основы статистики. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2008. 46 с.

14. ГОСТ Р 50779.11-2000. Статистические методы. Статистическое управление качеством. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2008. 42 с.

Сведения об авторе

Виктор С. Михайлов – ведущий инженер, Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики им. Д.И. Менделеева» ФГУП «ЦНИИХМ», 115487, Российская Федерация, Москва, ул. Нагатинская, д. 16а, e-mail: Mvs1956@list.ru

Вклад автора в статью

Автором проанализированы современные межгосударственные и российские стандарты в области терминологии надежности. На основе результатов анализа автором предложено: в составе терминов по надежности конкретизировать определение изделия, отказа, объекта (в редакции ГОСТ Р 27.001-2009), термина «требования к надежности»; термины надежность, безотказность, долговечность и подобное определять как установленную способность изделия выполнять требуемую функцию в заданных обстоятельствах; не вводить в межгосударственный стандарт термин «оценка надежности».

Учет влияния корреляционных связей через их усреднение по модулю при нейросетевом обобщении статистических критериев для малых выборок

Александр И. Иванов^{1*}, Андрей Г. Банных², Юлия И. Серикова²

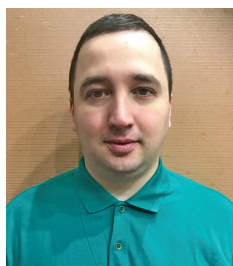
¹АО «Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт», Российская Федерация, Пенза,

²ФБГОУ ВПО «Пензенский государственный университет», Российская Федерация, Пенза

*ivan@pniei.penza.ru



Александр И. Иванов



Андрей Г. Банных



Юлия И. Серикова

Резюме. Целью работы является демонстрация преимуществ учета реальных корреляционных связей через их симметризацию, что значительно лучше полного игнорирования реально существующих корреляционных связей при статистических оценках на малых выборках. **Методы.** Вместо разных по знаку и модулю реальных коэффициентов корреляции использованы одинаковые значения модулей коэффициентов корреляции. Показано, что эквивалентность преобразований симметризации возникает при условии совпадения вероятностей ошибок первого и второго рода для асимметричной и эквивалентной симметричной корреляционных матриц. Рассматривается процедура точного вычисления коэффициентов равной коррелированности данных путем подбора и процедура приближенного вычисления симметричных коэффициентов путем усреднении модулей реальных коэффициентов корреляции асимметричной матрицы. **Результаты.** Отмечается практически линейная зависимость равных вероятностей ошибок первого и второго рода с размерностью решаемой симметризованной задачи при логарифмических масштабах учитываемых переменных. Это в конечном итоге позволяет выполнять рассматриваемые в статье вычисления табличным способом на малоразрядных, малопотребляющих микроконтроллерах низкой стоимости. Рассмотренные в статье преобразования имеют квадратичную вычислительную сложность и сводятся к использованию, заранее построенных 8-ми разрядных таблиц двоичного кода, связывающих ожидаемую вероятность ошибок первого и второго рода с параметром равной коррелированности данных. Все выполняемые табличные вычисления корректны и не накапливают ошибок округления исходных данных. **Выводы.** Часто практикуемое сегодня полное игнорирование корреляционных связей при статистическом анализе является плохой практикой. Более корректным является замена матриц реальных коэффициентов корреляции их симметричными аналогами. Ошибка приближения, возникающая из-за простого усреднения модулей коэффициентов асимметричных корреляционных матриц, падает пропорционально квадрату их размерности или квадрату числа нейронов, обобщающих классические статистические критерии. При использовании 16-ти и более нейронов ошибка приближения становится пренебрежимо малой и ее можно не учитывать.

Ключевые слова: замена статистических критериев эквивалентными им нейронами; многокритериальный статистический анализ малых выборок; учет влияния корреляционных связей; симметризация корреляционных матриц.

Для цитирования: Иванов А.И., Банных А.Г., Серикова Ю.И. Учет влияния корреляционных связей через их усреднение по модулю при нейросетевом обобщении статистических критериев для малых выборок // Надежность. 2020. № 2. С. 28-34. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-2-28-34>

Поступила 14.06.2019 г. / После доработки 07.05.2020 г. / К печати 17.06.2020 г.

Проблема применения классических статистических критериев на малых выборках

Критерий проверки статистических гипотез Пирсона был создан в 1900 году и оказался очень удачным. Естественно, что в 1900 году вычислительная техника отсутствовала, соответственно, можно было создавать, исследовать и применять только относительно простые в вычислительном отношении критерии. Критерий Пирсона задал тренд статистических исследований на десятки лет. В итоге сотни математиков в XX веке создали порядка 200 статистических критериев, пригодных для применения в разных ограничивающих условиях.

К сожалению, все известные статистические критерии плохо работают на малых выборках. В таких предметных областях, как биометрия, медицина, биология, экономика, выборки реальных данных оказываются малы. Это обстоятельство мешает получать достоверные статистические оценки. Так, хи-квадрат критерий Пирсона на выборке в 21 опыт дает плохо разделимые состояния для данных с нормальным распределением и равномерным распределением (рис. 1).

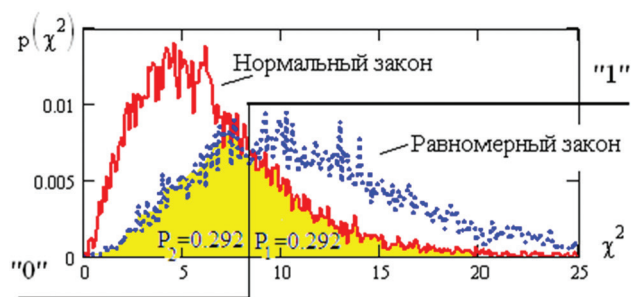


Рис.1. Настройка порога хи-квадрат нейрона $k = 7,5$ выполнена исходя из совпадения значений вероятностей ошибок первого и второго рода $P_1 = P_2 = P_{EE} = 0,292$.

Доверительная вероятность обнаружения данных с нормальным законом распределения при принятых условиях не велика – 0,708 ($1 - 0,292 = 0,708$), что неприемлемо для практики. Практически приемлемые доверительные вероятности получаются только на больших выборках [1] объемом в 200 и более примеров.

По сравнению с 1900 годом мы имеем техническую возможность многократного усложнения вычислений при проведении статистических оценок. В частности, мы имеем возможность воспользоваться несколькими разными статистическими критериями. Мы можем

поставить в соответствие каждому статистическому критерию искусственные нейроны [2, 3] и использовать их параллельно. На рис. 1 приведен один из вариантов настройки хи-квадрат нейрона с 5 входами, каждый вход такого нейрона анализирует один из интервалов гистограммы проверяемой тестовой выборки.

Выходной компаратор искусственного нейрона настроен так, чтобы вероятность P_1 ошибок первого рода была близка к вероятности P_2 ошибок второго рода. Этот технический прием позволяет снизить размерность решаемой задачи, заменив две переменные одной $P_1 = P_2 = P_{EE}$. Формально переменные P_1 и P_2 могут не совпадать, однако если их искусственно сделать одинаковыми (симметричными), то мы имеем возможность, за счет симметризации, упростить вычисления.

В табл. 1 даны значения совпадающих между собой вероятностей ошибок первого и второго рода для 8 разных статистических критериев (нейронов), где:

χ^2 – хи-квадрат критерий [2, 3, 4, 5];

ad^2 – критерий Андерсона-Дарлинга [4, 5];

adL – логарифмическая форма критерия Андерсона-Дарлинга [4, 5];

sg – критерий среднего геометрического [6, 7, 8];

sg_d – дифференциально-интегральный вариант критерия среднего геометрического [5, 7];

ω^2 – критерий Крамера-фон Мизеса [5, 7];

ω_c^2 – критерий Смирнова-Крамера-фон Мизеса [4, 5];

su^2 – критерий Шапиро-Уилка [5, 9].

Очевидно, что использование восьми статистических критериев вместо одного легко может быть выполнено на современных вычислительных устройствах с мало-разрядными микроконтроллерами (4-битными процессорами RFID идентификационных карт, с 8-битными процессорами современных контроллеров, с малопотребляющими процессорами SIM-карт или микро-SD карт). При этом нейросетевая реализация такого технического решения будет давать кодовое состояние «00000000», когда все критерии (все нейроны) принимают решение в пользу нормального закона распределения значений малой выборки. Если же все нейроны примут решение в пользу равномерного распределения значений, то мы получим выходной код «11111111».

На практике далеко не всегда разряды выходного кода нейросети имеет одинаковые состояния. В этих случаях принимают решение, опираясь на большинство наблюдаемых состояний. То есть, все коды с большинством состояний «0» принимают как решение об обнаружении нормального распределения значений входной выборки из 21 опыта.

Табл. 1. Значения вероятностей ошибок для критериев проверки статистических гипотез при выборках в 21 опыт

№, i	1	2	3	4	5	6	7	8
Критерий	χ^2	ad^2	adL	sg	sg_d	ω^2	ω_c^2	su^2
P_{EEi}	0,292	0,349	0,320	0,320	0,278	0,351	0,311	0,322

Все преобразования, которые можно выполнять на малоразрядных микроконтроллерах, можно выполнить и на настольных компьютерах с использованием, соответствующего программного обеспечения. Такой подход вполне приемлем при научных исследованиях, однако его нельзя применять при массовых биометрических вычислениях. Для обеспечения требований информационной безопасности биометрико-нейросетевые вычисления и криптографические преобразования должны выполняться только в доверенной вычислительной среде, реализованной, как правило, на малоразрядном, малопотребляющем микроконтроллере низкой стоимости.

Грубая статистическая оценка в рамках гипотезы полного отсутствия корреляционных связей между откликами, обобщаемых статистических критериев

В табл. 1 приведены данные всего о 8 статистических критериях (статистических нейронах). По этой причине мы можем провести численный эксперимент и определить вероятности появления каждого из 256 кодовых состояний. Если же мы увеличим число нейронов с 8 до 256, вычислить вероятности появления всех кодовых состояний окажется технически очень сложно. По мере увеличения числа параллельно работающих нейронов сложность такой вычислительной задачи растёт экспоненциально.

Так как мы не умеем точно учитывать влияние корреляционных связей между разрядами выходного кода, пойдем по пути упрощения и примем гипотезу независимости анализируемых данных. В этом случае взаимное усиление восьми критериев можно оценить как произведение равновероятных ошибок табл. 1:

$$P_{EE(8)} = \prod_{i=1}^8 P_{EEi} \approx 0,0001. \quad (1)$$

Среднее геометрическое вероятностей P_{EE} восьми критериев составляет 0,316. Если предположить, что 256 параллельно используемых статистических критериев независимы, а их среднее геометрическое 0,316, то мы получаем очень оптимистичную оценку вероятности появления ошибок:

$$P_{EE(256)} \approx \prod_{i=1}^{256} P_{EEi} \approx \left\{ \sqrt[8]{\prod_{i=1}^8 P_{EEi}} \right\}^{256} \approx 0,316^{256} \approx 10^{-128}. \quad (2)$$

Данные реального численного эксперимента для 8 статистических нейронов табл. 1 хуже примерно в 80 раз, чем оптимистическая оценка (1). Это говорит о том, что гипотеза независимости состояний статистических нейронов неприменима к нашему случаю. Нельзя пренебрегать существующими корреляционными связями при нейросетевом обобщении множества классических статистических критериев.

Учет корреляционных связей через их симметризацию: оценка корректности гипотезы равной коррелированности откликов обобщаемых статистических критериев

Так как реальными корреляционными связями пренебрегать нельзя, нейросетевая биометрия [10, 11, 12, 13] примерно с 1999 года пользуется практическим приемом симметризации корреляционных связей. Суть приема состоит в том, что реальная матрица коэффициентов корреляции заменяется некоторым эквивалентом с одинаковыми элементами вне диагонали:

$$\begin{bmatrix} 1 & r_1 & r_2 & \cdots & r_n \\ r_1 & 1 & r_{n+1} & \cdots & r_{2n-2} \\ r_2 & r_{n+1} & 1 & \cdots & r_{3n-3} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_n & r_{2n-2} & r_{3n-3} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} 1 & \tilde{r} & \tilde{r} & \cdots & \tilde{r} \\ \tilde{r} & 1 & \tilde{r} & \cdots & \tilde{r} \\ \tilde{r} & \tilde{r} & 1 & \cdots & \tilde{r} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \tilde{r} & \tilde{r} & \tilde{r} & \cdots & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Условие корректной симметризации (3) сводится к совпадению вероятностей ошибок первого и второго рода для исходной асимметричной модели и для конечной симметричной модели:

$$P_{EE} \approx P_2 \{ [r_{i,j}] \} \approx P_1 \{ [r_{i,j}] \} \approx \tilde{P}_2 \{ [\tilde{r}] \} \approx \tilde{P}_1 \{ [\tilde{r}] \}. \quad (4)$$

Для любой реальной корреляционной матрицы всегда можно подобрать симметричную эквивалентную корреляционную матрицу с одинаковыми значениями коэффициентов коррелированности данных. Чтобы выполнить симметризацию точно, необходим итерационный процесс подбора параметра $\tilde{r}$. Такой подход к решению задачи похож на обучение искусственных нейронов итерационным алгоритмом по критерию движения систем в сторону выполнения условия (4). Вычислительная сложность подобных итерационных процессов сильно зависит от размерности решаемых задач. Принято считать, что итерационный подбор при обучении нейронных сетей имеет полиномиальную вычислительную сложность (для нашего случая порядок полинома всегда оказывается ниже размерности симметризуемой матрицы).

Интересно отметить, что первое приближение коэффициентов равной коррелированности симметричной матрицы может быть получено простым усреднением модулей коэффициентов коррелированности исходной асимметричной матрицы (эта процедура имеет квадратичную вычислительную сложность):

$$\tilde{r} \approx \frac{2}{n^2 - n} \cdot \sum_{i=1}^{\frac{n^2 - n}{2}} |r_i| \quad (5)$$

Табл. 2. Коэффициенты корреляции, между парами рассматриваемых статистических критериев

	χ^2	ad^2	adL	sg	sg_d	ω^2	ω_c^2	su^2
χ^2	1	0,423	0,672	0,037	-0,042	0,559	0,401	-0,726
ad^2	0,423	1	0,644	0,018	-0,145	0,226	0,393	-0,113
adL	0,672	0,644	1	0,056	0,209	0,827	0,832	-0,917
sg	0,037	0,018	0,056	1	0,132	0,414	0,402	-0,212
sg_d	-0,042	-0,145	0,209	0,132	1	-0,242	-0,142	-0,041
ω^2	0,559	0,226	0,827	0,414	-0,242	1	0,885	-0,667
ω_c^2	0,401	0,393	0,832	0,402	-0,142	0,885	1	-0,764
su^2	-0,726	-0,113	-0,917	-0,212	-0,041	-0,667	-0,764	1

где i – номера коэффициентов корреляции, находящихся вне диагонали исходной асимметричной корреляционной матрицы.

Очевидно, что соотношение (5) является приближением, соответственно необходимо оценивать ошибку приближения $\Delta\tilde{r}$ как функцию размерности n матрицы. Для оценок скорости снижения ошибок воспользуемся корреляционными связями 8-ми нейросетевых реализаций статистических критериев, данные о которых приведены в табл. 2.

Данные о корреляционных связях табл. 2 могут быть использованы для оценки скорости сходимости рассматриваемых вычислительных операций. Для этой цели достаточно случайным образом выбирать тройки из восьми статистических критериев, применяя к их данным приближенное соотношение (5). Гистограмма результатов таких вычислений приведена на рис. 2 (красная линия).

Таковую же процедуру следует выполнить для пятерок, случайно выбранных из данных табл. 2. В итоге получается гистограмма данных, также приведенная на рис. 2 (синяя линия).

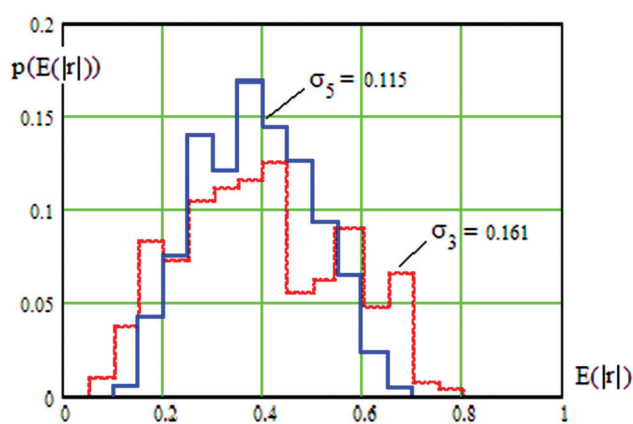


Рис. 2. Гистограммы распределения значений усредненных модулей коэффициентов корреляции не повторяющихся троек и пятерок статистических критериев табл. 2

Из рис. 2 видно, что с ростом размерности матрицы стандартное отклонение данных снижается со значения $\sigma_3=0,161$ до значения $\sigma_5=0,115$. При дальнейшем росте

размерности матриц происходит сжатие распределений возможных значений усредненных модулей. Кроме того, наблюдается эффект нормализации распределений возможных значений ошибок вычислений $\Delta\tilde{r}$ симметризации.

Численная оценка сходимости процедур симметризации корреляционных связей реальных биометрических данных

Следует отметить, что работы по нейросетевому объединению нескольких статистических критериев начаты недавно [2, 4, 5] и, как следствие, реальных статистических данных пока недостаточно. Совершенно иная ситуация создалась в нейросетевой биометрии [10, 11, 12, 13]. Работы по технологиям биометрико-нейросетевой аутентификации активно ведутся в России и в других странах с начала XXI века. Как следствие, накоплены большие обезличенные базы биометрических данных по нескольким технологиям, однако воспользоваться ими нельзя из-за этических ограничений. Доступ к подобной достоверной информации ограничен как у нас в стране, так и за рубежом.

Этические ограничения снимаются, если проблема доступа к большим объемам достоверной биометрической информации решается с помощью среды моделирования «БиоНейроАвтограф» [14, 15]. Этот программный продукт находится в свободном доступе и построен так, чтобы с его помощью русскоязычные университеты могли организовывать обучение своих студентов. Продукт анализирует динамику воспроизведения рукописным почерком написания букв и/или слов с помощью манипулятора «мышь» или любого графического планшета. Продукт «БиоНейроАвтограф» с помощью двумерного преобразования Фурье извлекает из динамики рукописного почерка 416 биометрических параметров и обучает алгоритмом ГОСТ Р 52633.5-2011 однослойную сеть из 256 искусственных нейронов.

Все данные о биометрических параметрах, весовых коэффициентах и связях нейронов доступны для наблюдения [15] (открыто хранятся в доступных для просмотра файлах формата *.txt). Пользуясь этими данными,

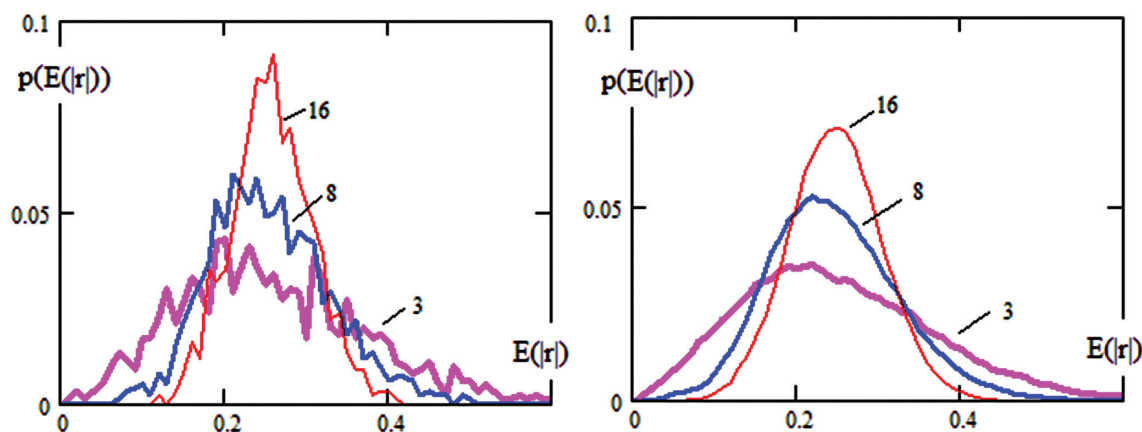


Рис. 3. Примеры распределений значений параметров симметризации $\tilde{r}$ без сглаживания (левая часть рисунка) и после сглаживания (правая часть рисунка) для размерности матриц от 3 до 16

сформируем обучающую базу из 30 примеров написания рукописного слова «Пенза» почерком одного человека. Загрузив данные о 30 примерах 416 биометрических параметров в среду моделирования MathCAD, мы имеем возможность построить матрицу 416×416 коэффициентов корреляции. В итоге мы получаем объем данных намного больше, чем в матрице 8×8 табл. 2.

Это позволяет случайно сформировать 1024 выборки по 3 биометрических параметра и усреднить по модулю их коэффициенты корреляции. При этом получившееся распределение значений результатов симметризации приведено на рис. 3. Аналогичные распределения приведены на этом же рисунке для случайных выборок в 8 и 16 биометрических параметров.

Из рис. 3 видно, что построенные распределения достаточно быстро нормализуются. При симметризации корреляционных коэффициентов матрицы 16×16 и выше распределение можно считать нормальным. То есть нормализация распределений идет быстрее, чем для хи-квадрат критерия. Асимметричные хи-квадрат распределения допустимо заменять нормальным только при учете 32 и более параметров. Более подробно вопросы приближения хи-квадрат распределений иными законами освещены в [16]. Эффект нормализации данных для рассматриваемых в статье процедур симметризации наступает в два раза быстрее в сравнении с нормализацией данных хорошо исследованного хи-квадрат критерия.

Еще одним важным моментом симметризации является то, что вносимая этим упрощением неопределенность монотонно снижается $\sigma_3 > \sigma_4 > \dots > \sigma_{256}$. Именно по этой причине учет взаимных корреляционных связей для векторов длиной 256 бинарных состояний длинного пароля или криптографического ключа дает достаточно точные предсказания при использовании простой процедуры симметризации [12, 13]. В первом приближении можно считать, что снижение неопределенности идет пропорционально $\sqrt{n^2 - n}/\sqrt{2}$. Это означает, что стандартное отклонение $\sigma_3 = 0,161$ (см. рис. 2) при нейросетевом обобщении 100 статистических критериев должно снизиться примерно в 50 раз до величины $\sigma_{100} \approx 0,0032$.

Простая номограмма для прогнозирования качества работы нейросетевых обобщений статистических критериев разной размерности

Достаточно точный прогноз достижимых вероятностей ошибок при разных условиях легко выполним, если воспользоваться средствами имитационного моделирования, воспроизводя работу 1, 2, ..., 8 нейронов при разных значениях коэффициентов равной коррелированности $\tilde{r} = \{0, 3, 0, 4, \dots, 0, 7\}$. Результаты имитационного моделирования хорошо описываются линейным приближением в логарифмических координатах [17], как это показано на рис. 4.

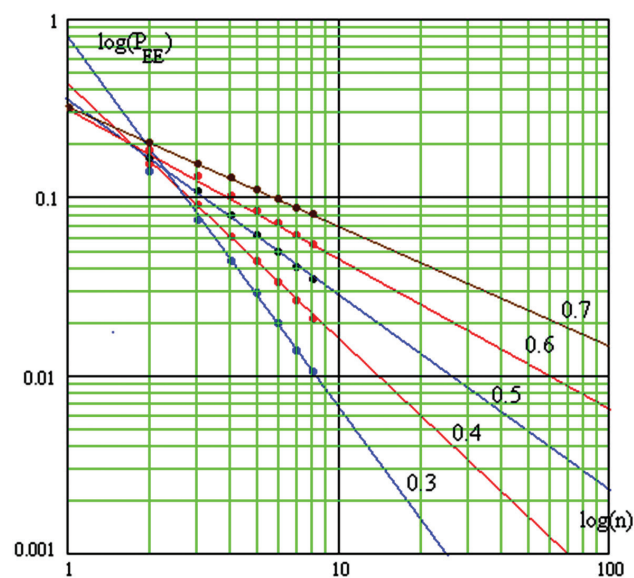


Рис. 4. Номограмма связи одинаковых вероятностей P_{EE} ошибок первого и второго рода нейросетевого обобщения для усредненных значений коэффициентов корреляции 0,3, 0,4, 0,5, 0,6, 0,7

Номограмма рис. 4, вычисленная для вероятностей ошибок каждого из нейронов, показывает значение

среднего геометрического вероятностей ошибок каждого из нейронов 0,316. Эта номограмма легко преобразуется для других значений среднего геометрического вероятностей ошибок каждого из нейронов. Для этого достаточно выполнить смещение данных вверх, если вероятность ошибок увеличивается или вниз, если вероятность ошибок падает.

Из рис. 3 видно, что стремиться к повышению мощности статистических критериев не так выгодно, как стремиться к снижению их коррелированности. Так, при значении коррелированности $\tilde{r} = 0,4$ в группе из 8 рассмотренных критериев для достижения вероятности ошибок на уровне 0,001 потребуется 70 нейронов (70 статистических критериев). Если же удастся снизить уровень взаимной коррелированности данных до величины $\tilde{r} = 0,3$, то для достижения того же уровня вероятности ошибок достаточно будет использовать 17 нейронов (17 статистических критериев).

Заключение

В данной статье мы попытались показать, что методы симметризации многомерных задач достаточно просты и эффективны. После симметризации задачи оценки вероятностей ошибок нескольких нейронов с учетом их взаимных корреляционных связей удастся построить простую номограмму, предсказывающую, сколько должно потребоваться нейронов для достижения той или иной вероятности ошибок первого и второго рода.

В настоящее время имеющиеся в нашем распоряжении вычислительные средства не накладывают ограничений на число обобщаемых нейронной сетью статистических критериев. Вопрос только в том, насколько сотни классических статистических критериев коррелированы между собой. К сожалению, большинство классических статистических критериев дают сильно коррелированные результаты. Именно высокий уровень их коррелированности становится очередным техническим ограничением. Это означает, что растет актуальность задачи синтеза новых статистических критериев, данные которых слабо коррелированы относительно большинства уже известных статистических критериев.

Тем не менее, можно с уверенностью утверждать, что в ближайшие несколько лет доверительная вероятность к статистическим оценкам на малых выборках должна существенно увеличиться. Нейросетевое обобщение сотен уже известных статистических критериев переходит из разряда сложных научных задач в разряд достаточно простых инженерных задач. Более того, приведенные в данной статье приближения позволяют учитывать влияние корреляционных связей с реализацией вычислений на малоразрядных, малопотребляющих микроконтроллерах RFID-карт, SIM-карт и микро-SD карт, что должно способствовать массовому применению рассматриваемых преобразований при решении задач биометрико-криптографической аутентификации личности.

Библиографический список

1. Р 50.1.037-2002. Рекомендации по стандартизации. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть I. Критерии типа χ^2 . М.: Госстандарт России, 2001. 140 с.
2. Иванов А.И., Куприянов Е.Н., Туреев С.В. Нейросетевое обобщение классических статистических критериев для обработки малых выборок биометрических данных // Надежность. 2019. № 2. С. 22–27. DOI: 10.21683/1729-2646-2019-19-2-22-27
3. Ахметов Б.Б., Иванов А.И. Оценка качества малой выборки биометрических данных с использованием более экономичной формы хи-квадрат критерия // Надежность. 2016. № 2(57). С. 43–48.
4. Волчихин В.И., Иванов А.И., Безяев А.В., Куприянов Е.Н. Нейросетевой анализ малых выборок биометрических данных с использованием хи-квадрат критерия и критериев Андерсона-Дарлинга // Инженерные технологии и системы. 2019. Т. 29. № 2. С. 205–217. DOI: 10.15507/2658-4123.029/2019.02.205-217
5. Иванов А.И., Банных А.Г., Куприянов Е.Н. и др. Коллекция искусственных нейронов эквивалентных статистическим критериям для их совместного применения при проверке гипотезы нормальности малых выборок биометрических данных / Сборник научных статей по материалам I Всероссийской научно-технической конференции «Безопасность информационных технологий», 24 апреля 2019 г. Пенза, 2019. С. 156–164.
6. Перфилов К.А. Критерий среднего геометрического, используемый для проверки достоверности статистических гипотез распределения биометрических данных / Труды научно-технической конференции кластера пензенских предприятий, обеспечивающих безопасность информационных технологий. Пенза, 2014. Том 9. С. 92–93. URL: <http://www.pniei.penza.ru/RV-conf/T9/C92> (дата обращения 14.04.2020 г.).
7. Иванов А.И., Малыгина Е.А., Перфилов П.А. и др. Сравнение мощности критерия среднего геометрического и Крамера-фон Мезиса на малых выборках биометрических данных. // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. 2016. № 2. С. 155–158.
8. Иванов А.И., Перфилов К.А., Малыгина Е.А. Многомерный статистический анализ качества биометрических данных на предельно малых выборках с использованием критериев среднего геометрического, вычисленного для анализируемых функций вероятности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2016. № 2(16). С. 58–66.
9. Иванов А.И., Вятчанин С.Е., Малыгина Е.А. и др. Прецизионная статистика: нейросетевое объединение хи-квадрат критерия и критерия Шапиро-Уилка при анализе малых выборок биометрических данных. / Труды международного симпозиума «Надежность и качество», 2019. Т. 2. С. 131–134.

10. Иванов А.И. Биометрическая идентификация личности по динамике подсознательных движений: Монография. Пенза: Изд-во ПГУ, 2000. 178 с.

11. Иванов А.И. Нейросетевые технологии биометрической аутентификации пользователей открытых систем. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.01 «Системный анализ, управление и обработка информации». Пенза, 2002. 34 с.

12. Малыгин А.Ю., Волчихин В.И., Иванов А.И. и др. Быстрые алгоритмы тестирования нейросетевых механизмов биометрико-криптографической защиты информации. Пенза: Издательство Пензенского государственного университета, 2006. 161 с.

13. Ахметов Б.С., Волчихин В.И., Иванов А.И. и др. Алгоритмы тестирования биометрико-нейросетевых механизмов защиты информации. Казахстан, Алматы, КазНТУ им. Сатпаева, 2013. 152 с. URL: <http://portal.kazntu.kz/files/publicate/2014-01-04-11940.pdf> (дата обращения 14.04.2020 г.)

14. Иванов А.И., Захаров О.С. Среда моделирования «БиоНейроАвтограф»: Программный продукт (создан лабораторией биометрических и нейросетевых технологий, размещен с 2009 г. на сайте АО «ПНИЭИ» для свободного использования) [Электронный ресурс]. URL: <http://пниэи.рф/activity/science/noc/bioneuroautograph.zip> (дата обращения 14.04.2020 г.).

15. Иванов А.И. Автоматическое обучение больших искусственных нейронных сетей в биометрических приложениях: Учебное пособие к пакету лабораторных работ, выполняемых в среде моделирования «Био-НейроАвтограф» [Электронный ресурс]. Пенза: ОАО «ПНИЭИ», 2013. 32 с. URL: <http://пниэи.рф/activity/science/noc.htm> (дата обращения 14.04.2020 г.)

16. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.

17. Ivanov A.I., Lozhnikov P.S., Bannykh A.G. A simple nomogram for fast computing the code entropy for 256-bit codes that artificial neural networks output // Journal of Physics: Conference Series. 2019. Vol. 1260(2). P. 022003.

Сведения об авторах

Александр И. Иванов – доктор технических наук, доцент, научный консультант АО «Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт», 440000, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Советская, 9, тел. (841-2) 59-33-10, e-mail: ivan@pniei.penza.ru

Андрей Г. Банных – аспирант третьего года обучения кафедры «Техника систем информационной безопасности» ФБГОУ ВПО «Пензенский государственный университет», 440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, 40, тел. (841-2) 36-82-23, e-mail: ibst@pnzgy.ru

Юлия И. Серикова – аспирантка третьего года обучения кафедры «Вычислительная техника» ФБГОУ ВПО «Пензенский государственный университет», 440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, 40, e-mail: julia-ska@yandex.ru

Вклад авторов в статью

Иванов А.И. предложил методику оценки корректности процедур приближенного вычисления коэффициентов равной коррелированности путем простого усреднения модулей реальных коэффициентов асимметричной корреляционной матрицы.

Банных А.Г. выполнил синтез 8-битных таблиц, связывающих прогнозируемые вероятности ошибок первого и второго рода с параметром равной коррелированности для заранее заданного числа искусственных нейронов в логарифмической системе координат.

Серикова Ю.И. разработала программное обеспечение по контролю скорости сходимости рассматриваемых в статье вычислительных процессов.

Разработка алгоритмов для надежного обмена данными между автономными роботами на основе принципов самоорганизующейся сети

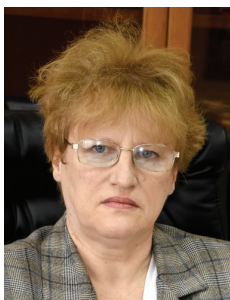
Александр В. Ермаков^{1*}, Лариса И. Сучкова¹

¹Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Российская Федерация, Алтайский край, Барнаул

*tour0@ya.ru



Александр В. Ермаков



Лариса И. Сучкова

Резюме. Рассмотрены факторы, влияющие на надежность передачи данных в сетях с узлами с периодической доступностью. Приведены принципы передачи данных между роботами, показана необходимость глобальной связности коммуникаций внутри автономной системы, так как отсутствие информации о намерениях других автономных роботов понижает эффективность робототехнической системы в целом и отрицательно влияет на отказоустойчивость в условиях распределения работ в коллективе независимых исполнителей поставленного задания. Показано, что существующие решения задачи обмена данными на основе IP-сетей общего назначения обладают рядом недостатков, поэтому в качестве основы организации сетевого взаимодействия автономных роботов использовались наработки в области топологических моделей систем связи, что позволяет строить самоорганизующиеся сети. Перечислены требования к проектируемой сети для надежной передачи сообщений между автономными роботами, выбран вариант организации надежной доставки сообщений с помощью оверлейных сетей, позволяющих расширить функционал сетей со стабильной конфигурацией. Приведен обзор существующих управляемых и неуправляемых оверлейных сетей, произведена оценка их применимости для коммуникации внутри коллектива автономных роботов. Описаны требования к механизму обмена данными в связи с особенностями и спецификой работы коллектива автономных роботов. Для описания алгоритмов и архитектуры оверлейной самоорганизующейся сети использовались общепринятые методы построения децентрализованных сетей с нулевой конфигурацией. В результате работы были предложены общие принципы функционирования спроектированной сети, описана структура сообщений для алгоритма доставки, произведено выделение служебных маршрутизируемых потоков данных, описаны алгоритмы пересылки сообщений между узлами сети, разработаны алгоритмы сбора и синхронизации глобального статуса сети. Для повышения надежности и отказоустойчивости работы сети предложено хранение глобального статуса сети на каждом из узлов. Описаны принципы функционирования распределенного хранилища данных. Для информирования об изменениях в статусе сети предложено использование отдельного канала управления для внутрисетевых служебных сообщений, не пересекающегося с передаваемыми данными. Разработан алгоритм лавинной маршрутизации для уменьшения задержек и ускорения процесса синхронизации глобального статуса сети и поддержки его консистентности. Предложено использовать hello-протокол для установки и поддержания соседских отношений между узлами сети. Приведены примеры добавления и удаления узлов сети, рассмотрены возможные проблемы масштабируемости разрабатываемой сети и способы их решения. Подтверждены критерии и показатели достижения эффекта самоорганизации отдельных узлов в сеть. Произведено сравнение спроектированной сети с существующими аналогами. Для разработанных алгоритмов приведены примеры расчетных оценок временных задержек доставки сообщений. Указаны теоретические ограничения оверлейной сети при наличии преднамеренных и непреднамеренных дефектов, а также приведен пример восстановления работоспособности сети после сбоя.

Ключевые слова: надежность; доставка сообщений; гарантированная доставка данных; оверлейная сеть; автономный робот; групповое взаимодействие; мультиагентная робототехническая система.

Для цитирования: Ермаков А.В., Сучкова Л.И. Разработка алгоритмов для надежного обмена данными между автономными роботами на основе принципов самоорганизующейся сети // Надежность. 2020. № 2. С. 35-42. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-2-35-42>

Поступила 21.11.2020 г. / После доработки 14.04.2020 г. / К печати 17.06.2020 г.

Введение

Успешность выполнения задач коллективом роботов зависит от надежности коммуникаций между членами коллектива, а именно от гарантии доставки сообщения до исполнителя и получения ответа.

Проблему повышения надежности передачи данных в сети с мерцающими узлами рассматривал Лавров Д.Н. в работах [1–2]. Под мерцающим узлом понималось промежуточное устройство, способное передавать сообщения и характеризующееся нестабильностью работы, либо непостоянством присутствия в сети, в том числе, в результате перемещения узла в пространстве.

Концепция узлов с периодической доступностью применима для крупных подвижных объектов – кораблей, самолетов, поездов, робототехнических систем [3]. Существуют определенные наработки в области топологических моделей систем связи, которые также могут быть применимы к самоорганизующимся компьютерным сетям. Главная особенность таких алгоритмов – невозможность гарантировать передачу информации по заданному маршруту в связи с динамической природой сети и меняющейся топологией.

Вопросы взаимодействия между членами коллектива мобильных роботов начали возникать в конце 80-х годов XX века, ранее исследования были сосредоточены на единичных робототехнических системах или на распределенных системах, не связанных с робототехникой [4].

Исследования Юна Ота [5] подтверждают существование класса задач, которые оптимально решаются с применением групповой робототехники, одним из постулатов которой является способность параллельного и независимого выполнения подзадач, сокращающего общее время выполнения поставленной задачи. Любая система, в которой используется множество взаимозаменяемых агентов, позволяет увеличить отказоустойчивость простой заменой вышедшего из строя робота рабочим, однако, создание многофункциональных агентов связано с большими затратами по сравнению с созданием агентов, выполняющих специализированные задачи. Распределенный подход позволяет проектировать специализированных роботов, которые выполняют нагрузку, вызывающую сложности у других агентов [6].

Из работы Майкла Кригера, Жан-Бернара Биллера и Лорана Келлера [7] известно, что при распределении работ по коллективу роботов может наблюдаться снижение эффективности системы в целом. Например, даже если суммарная стоимость мультиагентной системы окажется ниже, чем монолитное решение, управлять такой системой может оказаться затруднительно из-за децентрализованности или отсутствия глобального хранилища данных. Отсутствие информации о намерениях других агентов может привести к ситуации, когда отдельные роботы будут мешать друг другу выполнять поставленные задачи. Чтобы избежать этого, требуется глобальная связность, обеспечивающая надежный обмен данными между автономными роботами для глобально-

го и локального планирования и выполнения локальных задач каждым агентом в последующем.

Обмен данными в постоянно меняющихся внешних условиях является фактором, непосредственно влияющим на стабильность и эффективность работы коллектива роботов. В связи с этим разработка и исследование надежных алгоритмов коммуникации актуальны и являются средством повышения надежности функционирования роботизированной системы в целом. В работе [8] проведены экспериментальные исследования отказоустойчивости, показывающие важность обеспечения надежности связи применительно к коллективу роботов.

Особый интерес представляет исследование алгоритмов коммуникации между автономными роботами, так как от надежности и стабильности их работы зависит скорость принятия решений и возможность согласованной работы коллектива в целом.

В настоящее время для создания связи на коротких расстояниях используются mesh-сети, представляющие собой распределенные самоорганизующиеся сети с ячеистой топологией, разворачиваемые на основе беспроводных сетей Wi-Fi [9].

Вышележащие протоколы, такие, как TCP, гарантируют надежную доставку сообщений по такой сети. Однако в связи с ростом объема коммуникаций в сети Интернет и необходимостью бесперебойной работы сети стало затруднительным внесение новых базовых протоколов и изменений в их структуру для предоставления новых услуг и развертывания новых сервисов [10]. Оверлейные сети позволяют расширить функционал сети, не затрагивая нижележащие базовые протоколы [11], и могут предоставлять следующие услуги: создание отказоустойчивых сетей [12], точки randevu [13], поиск [14–15], причем эти услуги сложно обеспечивать на уровне IP протокола.

Решение проблемы надежной доставки сообщений до узла в сети существующие популярные оверлейные сети осуществляют различными способами. Одни сети специализируются на анонимности (tor [16], I2P [17]), гарантируя безопасную доставку, другие – на быстром развертывании беспроводной сети Wi-Fi (MANET [18], netsukuku [19]).

Оверлейные сети абстрагируются от нижележащих протоколов, так, например, сеть может использовать различную среду передачи данных в разных сегментах гетерогенной сети. Единственным требованием к сетям, поверх которых работает оверлейная сеть, является наличие маршрута между подсетями. На рисунке 1 приведен пример оверлейной сети, построенной поверх IP-сети.

Авторы работы [10] классифицируют оверлейные сети на две большие категории:

- управляемые сети, где каждому узлу сети известны все узлы сети и их возможности;
- неуправляемые сети, где ни одному из узлов не известна полная топология сети.

Неуправляемые сети, как правило, строятся на основе

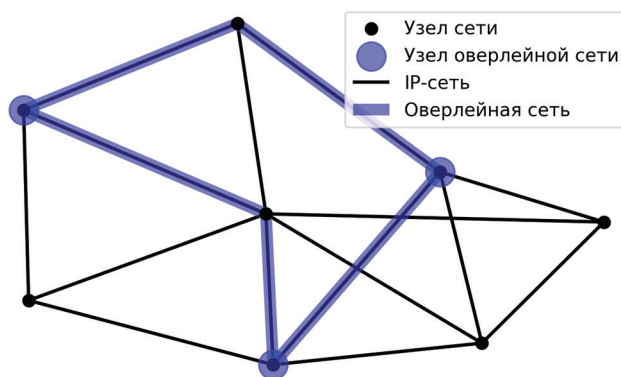


Рис. 1. Пример оверлейной сети, построенной поверх IP-сети

локальных сетей. В противоположность им, управляемые оверлейные сети централизованы или имеют один из механизмов распределенного хранения глобального статуса сети, например, распределенные хэш-таблицы (Distributed Hash Tables, DHT) [20–22].

Сеть tor использует TCP-потоки для связи между узлами сети и луковую маршрутизацию для пересылки сообщений внутри сети. Она не является полностью децентрализованной, так как существуют сервера каталогов, хранящие информацию о состоянии сети [16]. Сеть tor требует обязательного наличия Интернета.

У прочих пиринговых сетей или сетей на основе DHT отсутствует функционал пересылки сообщений другим узлам, и для работы они также требуют наличия сети Интернет.

Таким образом, в настоящее время отсутствуют сетевые решения для обеспечения надежной коммуникации в коллективе автономных роботов.

При разработке алгоритмов для надежной передачи сообщений между автономными роботами к самоорганизующейся сети предъявляются следующие требования:

- отсутствие ручной настройки узлов;
- клиент сети должен быть прост в реализации и установке (в том числе не требовать патчей ядра или определенную версию операционной системы);
- сеть должна работать на уровне пользователя без всяких специфических привилегий;
- сеть должна работать поверх стандартных протоколов TCP и/или UDP.

Рассмотренные выше существующие оверлейные сети не удовлетворяют перечисленным требованиям, поэтому была поставлена задача разработать алгоритмы для надежного обмена данными с использованием оверлейной сети.

Структура самоорганизующейся сети

Для обмена данными автономными роботами предлагается использовать оверлейную сеть, в которой обмен информацией осуществляется на прикладном

уровне по модели OSI поверх стандартных протоколов TCP и UDP.

Клиентское вычислительное устройство, в том числе, бортовой компьютер автономного робота, для подключения к оверлейной сети стартует программное обеспечение, которое устанавливает соединения с другими узлами сети и осуществляет пересылку данных между промежуточными узлами. Каждый узел сети в каждый момент времени поддерживает несколько соединений, обеспечивая резервирование каналов передачи данных.

Структура сообщения для алгоритма доставки

Сообщение является минимальной единицей данных, которые передаются внутри оверлейной сети. UDP-пакеты используются для анонсирования изменений сети и низкоприоритетных уведомлений, принимаются и разбираются целиком, что сокращает время обработки. TCP требует более сложного алгоритма обработки. Однако, благодаря фиксированному размеру заголовка сообщения и наличию поля длины данных, становится возможным разбор входящего TCP-потока на отдельные сообщения.

Сообщение описывается формальной структурой: {IDsrc; IDdest; CMD; LEN; P}, где:

IDsrc – идентификатор узла-отправителя (8 байтов);

IDdest – идентификатор узла назначения (8 байтов);

CMD – тип сообщения (1 байт);

LEN – длина поле данных (беззнаковое целое, 2 байта);

P – поле данных длиной LEN байт, закодированное протоколом protobuf2 [23].

Таким образом, сообщение состоит из заголовка длиной 19 байт и поля данных переменной длины.

Заголовок ячейки сети {IDsrc; IDdest; CMD; LEN} содержит идентификатор отправителя и идентификатор получателя. Идентификаторы узлов являются 64-битными числами, которые состоят из пары IP-адресов: {IPiface; IPext}, где:

IPiface – IP сетевого интерфейса;

IPext – внешний IP-адрес.

Мы считаем такой способ задания идентификаторов достаточным для наших целей. Он позволяет узлам самостоятельно генерировать себе уникальные идентификаторы, сводя вероятность коллизий к нулю.

В зависимости от типа сообщения CMD происходит выбор обработчика сообщения. Ячейки классифицируются на две группы: управляющие и передающие. Управляющие ячейки обрабатываются узлами-получателями. Например, это могут быть команды проверки доступности узла, запросы и ответы на изменения статуса сети (см. рисунок 2). Передающие ячейки содержат в себе данные, которые нужно обработать, если идентификатор получателя совпадает с текущим узлом, либо переслать дальше по сети.

Предложенная авторами технология обработки сообщений была реализована программно [24].

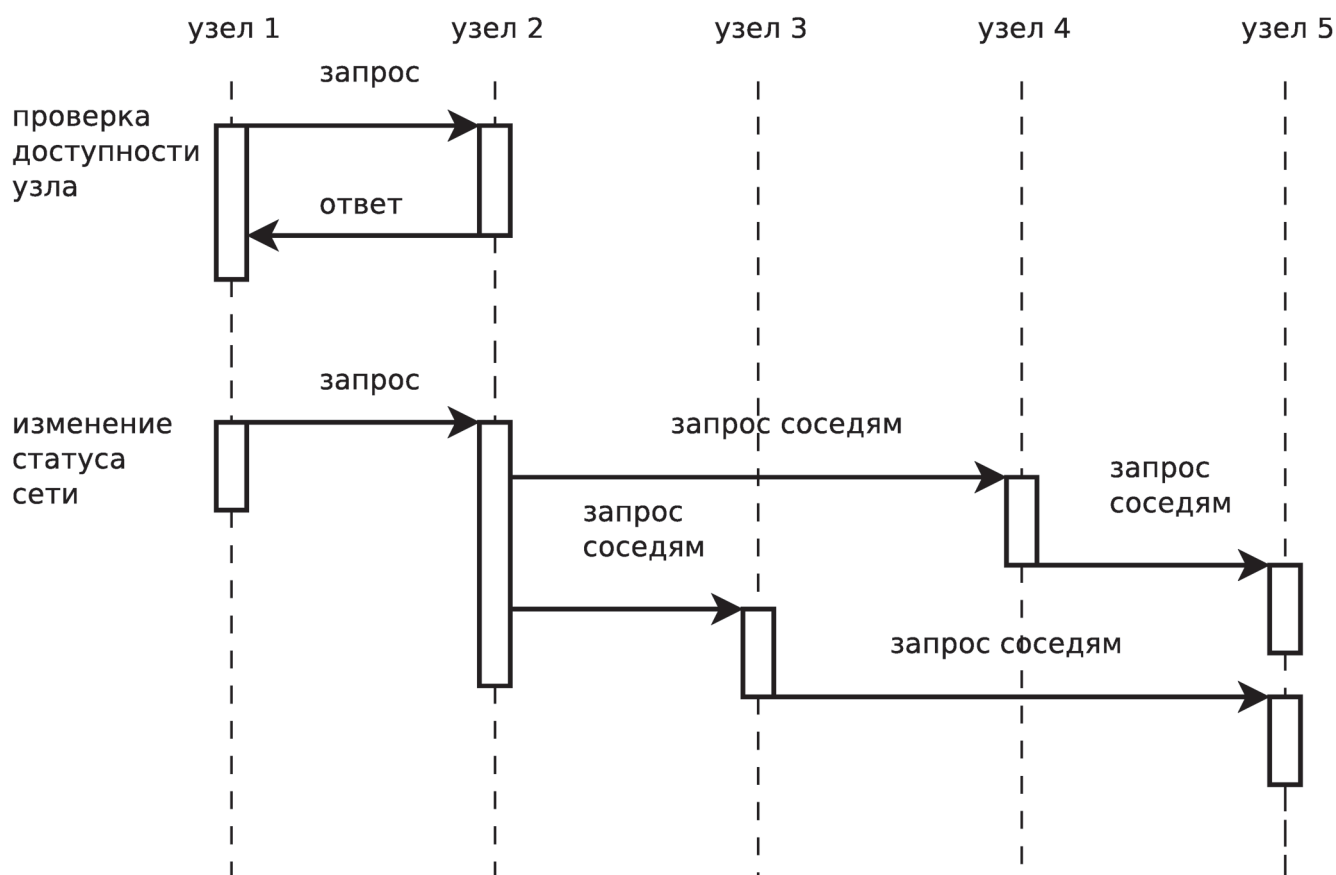


Рис. 2. Диаграмма последовательности обработки принятого сообщения узлами-соседями на примерах проверки доступности узла-соседа и информирования изменений в статусе сети

Алгоритмы сбора и синхронизация статуса сети

Сеть обмена данными между автономными роботами является управляемой, то есть для нее существует глобально обновляемый статус, содержащий сведения обо всех узлах сети. Информация о статусе сети хранится в полном объеме на каждом узле, таким образом, дублирование информации увеличивает надежность сети и ее отказоустойчивость в целом.

При добавлении нового узла для обнаружения других узлов сети в локальной сети используется широко-вещательная рассылка, при успешном обнаружении устанавливаются соединения с соседними узлами и синхронизируется статус сети. На этом этапе осуществляется обмен сообщениями одновременно по всем каналам («лавинная» рассылка) [1].

Для информирования при изменении статуса сети, осуществляемом, например, при добавлении нового узла, используется лавинная маршрутизация, когда узел сети пересылает полученные пакеты по всем своим непосредственным соседям, за исключением того узла, с которого он был получен. Такой подход увеличивает надежность передачи служебной информации и увеличивает вероятность получения сообщения всеми узлами сети. Проблема дублирования сообщений решается путем кеширования принятых сообщений и запрета повторной отправки сообщения.

На рисунке 3 приведена схема работы системы. Узел принимает сообщение из сети, в зависимости от значения типа сообщения CMD запускается алгоритм лавинной маршрутизации. Принятый пакет проверяется в буфере кеша пакетов, располагающегося в оперативной памяти. Если пакет был найден в кеше, то есть этот пакет был принят ранее, то алгоритм завершает работу, отбрасывая пакет и не обрабатывая его. В противном случае пакет добавляется в кеш, вытесняя из кеша самые старые записи. Далее поле данных P из пакета дешифруется и применяется к собранному глобальному статусу сети. После фиксации изменений пересчитывается хеш статуса сети. На этом локальные изменения завершаются, далее происходит информирование узлов-соседей путем массовой рассылки принятого сообщения. Формируется актуальный список узлов-соседей, а тем узлам, от которых недавно приходил HELLO-пакет, осуществляется немедленная отправка пакета по протоколу UDP, для остальных узлов сети сформированный пакет отправляется в очередь для дальнейшей асинхронной отправки.

Помимо лавинной маршрутизации, поддержание консистентности данных о статусе сети на всех узлах осуществляется путем периодической пересылки соседям хеша от списка известных идентификаторов узлов сети. При несовпадении хеша запускается процесс синхронизации между соседями. Наличие возможности получения данных о статусе сети от соседа позволяет

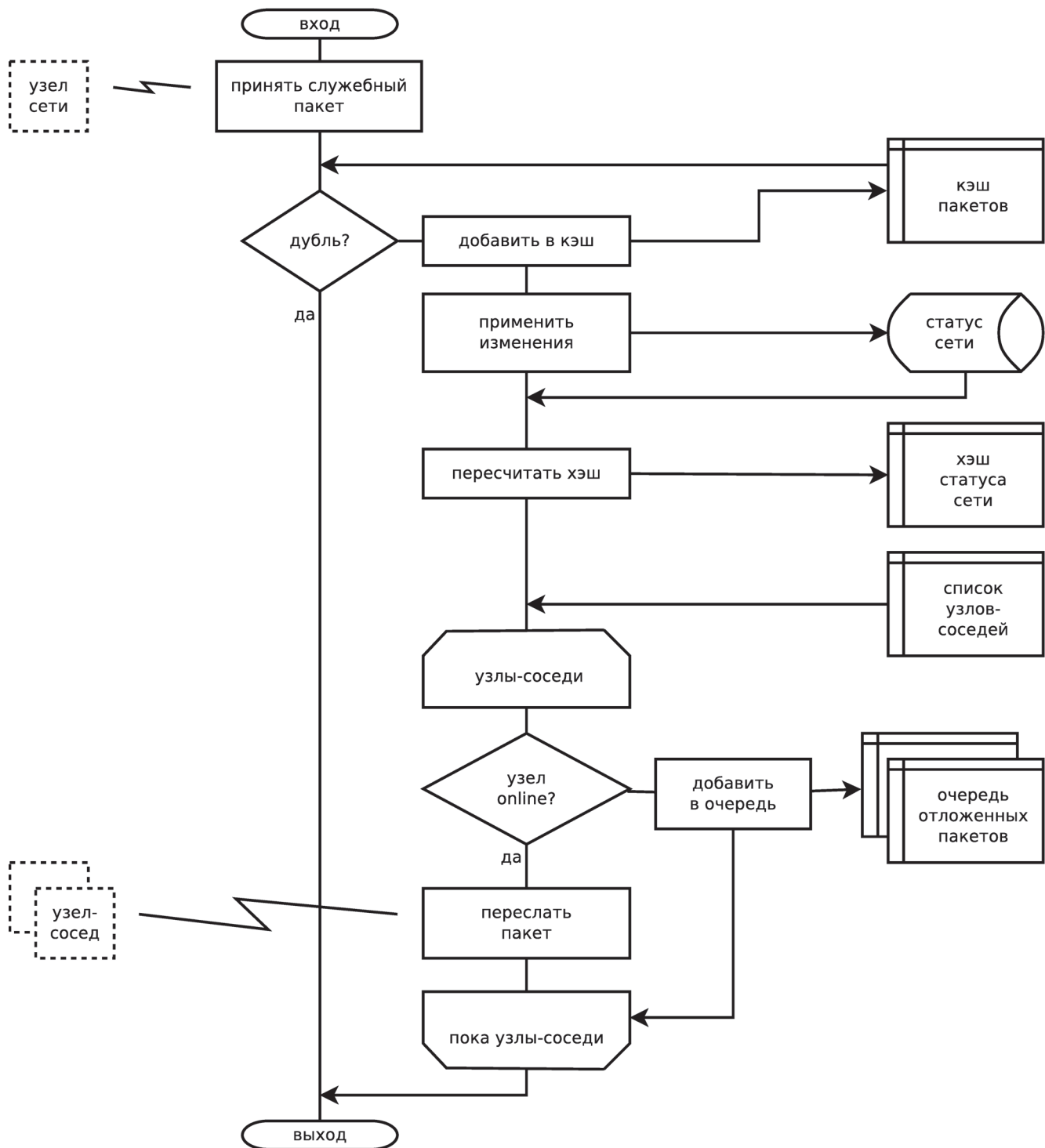


Рис. 3. Схема работы системы для алгоритма лавинной маршрутизации

ускорить добавление нового узла сети и не нагружать сеть пересылкой множества служебных сообщений [25].

Каждый узел рассылает соседям HELLO-пакеты, информируя о своей доступности. Перед завершением работы клиента сети, он рассылает в сеть уведомления об отключении. При разрыве соединения между узлами сети или при истечении таймута ожидания HELLO-пакета от соседа узел делает несколько попыток соединиться с потерянным узлом. Если узел оказывается

недоступен, то генерируется сообщение об удалении идентификатора из статуса сети. Таким образом, детектируются неисправности в сети и становится возможным оперативно реагировать на них [26].

Надежность является сложным физическим свойством, поэтому не существует одного обобщенного критерия и показателя, который бы достаточно полно характеризовал надежность техники. Только семейство критериев позволяет оценить надежность сложной

технической системы. Выбор критериев зависит от типа технического объекта, его назначения и требуемой полноты оценки надежности [27].

Одним из критериев надежности проектируемой оверлейной сети являются временные задержки. Предполагается, что оверлейная сеть должна обеспечивать надежность доставки сообщений при временной недоступности связи между узлами-соседями, в том числе из-за преднамеренных или непреднамеренных дефектов. Кроме того, необходимо учесть специфику применения предлагаемой сети для автономных робототехнических комплексов, когда приоритетом является мгновенная доставка сообщения, причем временный сбой при доставке предпочтительнее, чем получение сообщения с длительной задержкой (в некоторых задачах от 500 мс). Другой особенностью является независимость сообщений друг от друга. В предложенной сети не важен порядок доставки сообщений, что позволяет нам оптимизировать алгоритмы и протокол доставки по этому критерию.

Экспериментальное тестирование разработанных алгоритмов обмена данными

Для проведения эксперимента была создана тестовая сеть, состоящая из маршрутизатора Cisco Catalyst 2960 и шести компьютеров, работающих под управлением ОС Ubuntu 18.04. Для эмуляции нескольких сетей на

коммутаторе было сконфигурировано пять VLAN, в VLAN 0 разместились два компьютера, в остальных – по одному. Правилами маршрутизации был запрещен прямой обмен IP-пакетами между всеми подсетями, за исключением VLAN 0. В результате эксперимента было получено подтверждение самоорганизации сети, а также исследована работоспособность разработанных алгоритмов обмена данными.

Было произведено экспериментальное тестирование существующих сетевых протоколов TCP и UDP на действующей тестовой сети. Для этого осуществлялась пересылка данных между двумя маршрутизируемыми узлами сети. Потери пакетов эмулировались на сетевом интерфейсе узла правилом в iptables и модулем statistic, позволяющим осуществлять отбор части пакетов по условию. Для TCP открывалось одно соединение, внутри которого пересылались ячейки оверлейной сети. В UDP отсутствует механизм подтверждения доставки, поэтому принятие каждого пакета подтверждалось принимающей стороной. Если подтверждение не пришло по истечении таймаута, то пакет посылался повторно.

Рисунок 4 демонстрирует полученные в результате экспериментального исследования временные задержки на доставку каждого пакета с использованием стандартных протоколов TCP и UDP при запланированных потерях 0%, 5% и 10% пакетов.

При отсутствии потерь UDP показал минимальные задержки во время передачи данных, однако, даже при

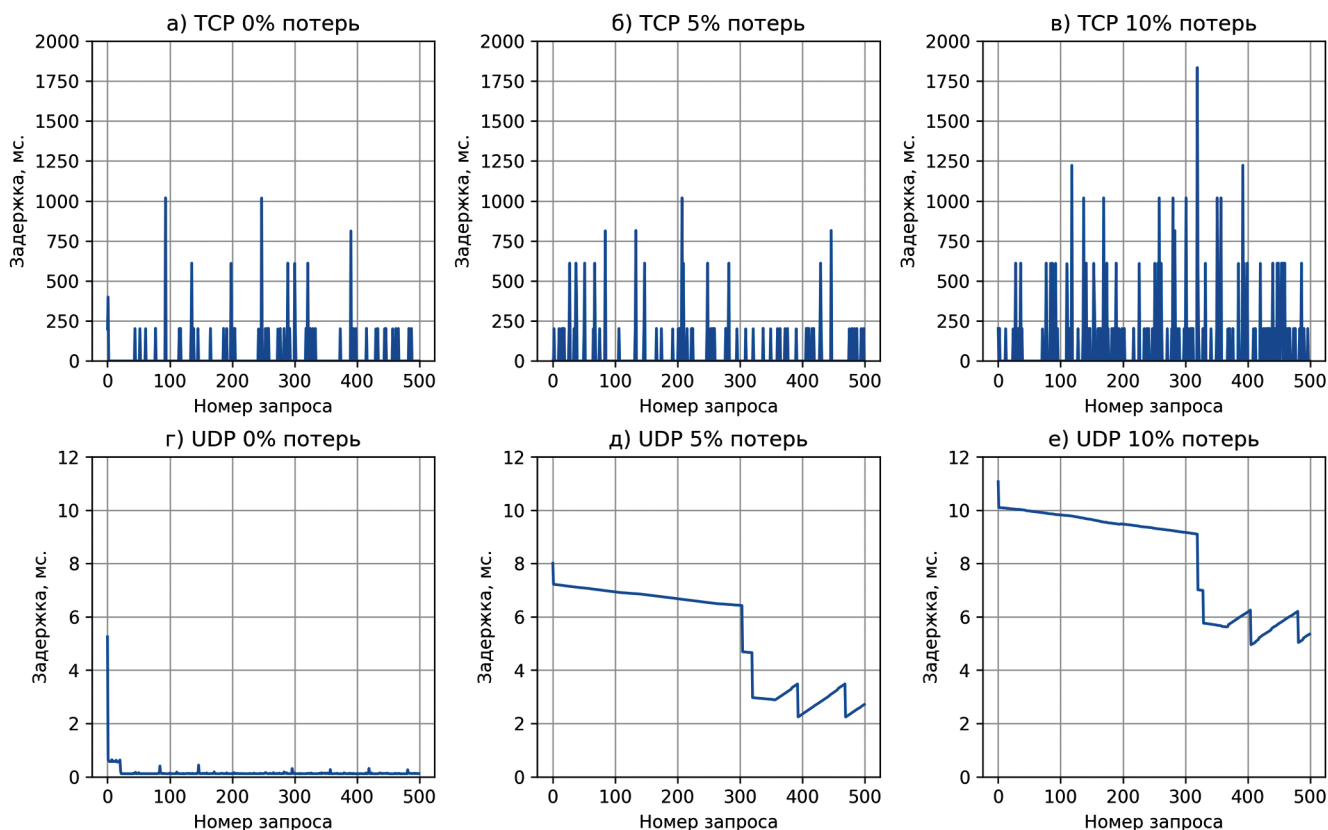


Рис. 4. Сравнение временных задержек доставки пакета стандартными протоколами при наличии потерь пакетов в сети: а) TCP, 0% потерь; б) TCP, 5% потерь; в) TCP, 10% потерь; г) UDP, 0% потерь; д) UDP, 5% потерь; е) UDP, 10% потерь

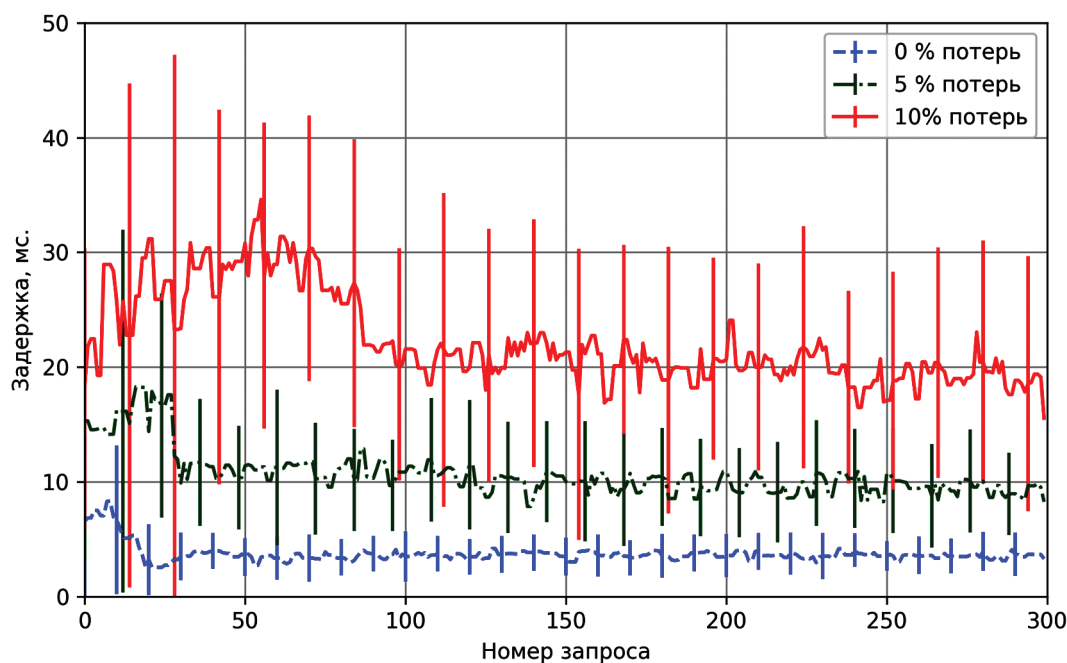


Рис. 5. Сравнение временных задержек доставки пакета внутри оверлейной сети при наличии дефектов сети

минимальных потерях увеличивается задержка и количество повторно отправляемых данных. Спустя 300-400 отправленных пакетов задержка стабилизируется на одном уровне (рисунок 4, д и 4, е).

При использовании ТСР отмечается долгое установление соединения (вплоть до секунды в некоторых случаях) и установка повторных соединений при разрыве. Столь долгие единичные задержки недопустимы для применения в сети для автономных робототехнических комплексов.

Зная результаты исследования временных задержек при использовании существующих протоколов обмена данными, стало возможным проводить оценку надежности разработанных алгоритмов. Тестирование оверлейной сети происходило в тех же условиях.

Предложенный нами алгоритм обмена данными характеризуется меньшими задержками после выхода системы на этап нормальной эксплуатации и показывает более высокую надежность за счет обеспечения мгновенной доставки и сведению к минимуму отказов, которые возникли бы при условии несвоевременной доставки сообщений. Применение 0-RTT handshake (установление соединения с нулевой задержкой) обеспечило требуемую производительность оверлейной сети.

Стабильность решения была проверена эксплуатацией в течение месяца ежедневного запуска сети, при этом деградации производительности или увеличения задержек доставки сообщений не замечено. Итоговые результаты эксперимента приведены на рисунке 5.

Заключение

Авторами данной статьи были разработаны алгоритмы функционирования оверлейной сети с учетом специфики ее использования автономными роботами.

Предполагаемый подход позволит обеспечить надежный обмен данными внутри автономной системы, тем самым достигая эффекта коллективного выполнения задач с распределением ролей и подцелей, что было бы неосуществимо при отсутствии межагентного взаимодействия и обмена текущей информацией.

Данные алгоритмы явились основой для построения тестовой программной системы, предназначенной для исследования процесса обмена данными в коллективе автономных роботов.

Библиографический список

1. Лавров Д.Н. Принципы построения протокола гарантированной доставки сообщений // Математические структуры и моделирование. 2018. № 4(48). С. 139–146. DOI: 10.25513/2222-8772.2018.4.139-146
2. Гусс С.В., Лавров Д.Н. Подходы к реализации сетевого протокола обеспечения гарантированной доставки при мультимаршрутной передаче данных // Математические структуры и моделирование. 2018. № 2(46). С. 95–101. DOI: 10.25513/2222-8772.2018.2.95-101
3. Сорокин А.А., Дмитриев В.Н. Описание систем связи с динамической топологией сети при помощи модели «мерцающего» графа // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2009. № 2. С. 134–139.
4. Parker L.E. Distributed Intelligence: Overview of the Field and its Application in Multi-Robot Systems // AAAI Fall Symposium: Technical Report, FS-07-06. 2008. P. 5–14. DOI: 10.14198/JoPha.2008.2.1.02
5. Ota J. Multi-agent robot systems as distributed autonomous systems // Advanced engineering informatics. 2006. Vol. 20. No. 1. P. 59-70. DOI: 10.1016/j.aei.2005.06.002.

6. Arai T. et al. Advances in multi-robot systems // IEEE Transactions on robotics and automation. 2002. Vol. 18. No. 5. P. 655–661.
7. Krieger M. J. B., Billeter J. B., Keller L. Ant-like task allocation and recruitment in cooperative robots // Nature. 2000. Vol. 406. No. 6799. P. 992–995. DOI: 10.1038/35023164.
8. Winfield A. F. T., Nembrini J. Safety in numbers: Fault tolerance in robot swarms // International Journal on Modelling Identification and Control. 2006. Vol. 1. P. 30–37. DOI: 10.1504/IJMIC.2006.008645
9. Bicket J. et al. Architecture and evaluation of an unplanned 802.11 b mesh network // Proceedings of the Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, MOBICOM. ACM, 2005. P. 31–42. DOI: 10.1145/1080829.1080833.
10. Srinivasan S. Design and use of managed overlay networks: дис. Georgia Institute of Technology, 2007.
11. Clark D. et al. Overlay Networks and the Future of the Internet // Communications and Strategies. 2006. Vol. 63. P. 109.
12. Benson K.E. et al. Resilient overlays for IoT-based community infrastructure communications // 2016 IEEE First International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation (IoTDI). 2016. P. 152–163. DOI: 10.1109/IoTDI.2015.40
13. Stoica I. et al. Internet indirection infrastructure // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. ACM, 2002. Vol. 32. No. 4. P. 73–86.
14. Ripeanu M. Peer-to-peer architecture case study: Gnutella network // Proceedings first international conference on peer-to-peer computing. IEEE, 2001. P. 99–100. DOI: 10.1109/P2P.2001.990433
15. Leibowitz N., Ripeanu M., Wierzbicki A. Deconstructing the kaza network // Proceedings the Third IEEE Workshop on Internet Applications. WIAPP, 2003. IEEE, 2003. P. 112–120. DOI: 10.1109/WIAPP.2003.1210295
16. Dingleline R., Mathewson N., Syverson P. Tor: The second-generation onion router. Naval Research Lab Washington DC, 2004.
17. Herrmann M., Grothoff C. Privacy-implications of performance-based peer selection by onion-routers: a real-world case study using I2P // International Symposium on Privacy Enhancing Technologies Symposium. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. С. 155–174. DOI: 10.1007/978-3-642-22263-4_9
18. Tandon N., Patel N. K. An Efficient Implementation of Multichannel Transceiver for Manet Multinet Environment // 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT). IEEE, 2019. P. 1–6. DOI: 10.1109/ICCCNT45670.2019.8944505
19. Кудряшова Э.Е., Вовченко А.В., Олейников Р.А. Исследование сети NETSUKUKU на основе фрактальных множеств // Вестник Международной академии системных исследований. Информатика, экология, экономика. 2008. Т. 11. № 1. С. 55–57.
20. Kumar A. et al. Ulysses: a robust, low-diameter, low-latency peer-to-peer network // European transactions on telecommunications. 2004. Vol. 15. No. 6. P. 571–587. DOI: 10.1002/ett.1013
21. Rowstron A., Druschel P. Pastry: Scalable, decentralized object location, and routing for large-scale peer-to-peer systems // IFIP/ACM International Conference on Distributed Systems Platforms and Open Distributed Processing. Springer, Berlin, Heidelberg, 2001.
22. Stoica I. et al. Chord: A scalable peer-to-peer lookup service for internet applications // ACM SIGCOMM Computer Communication Review. 2001. Vol. 31. No. 4. P. 149–160.
23. Feng J., Li J. Google protocol buffers research and application in online game // IEEE conference anthology. IEEE, 2013. P. 1–4. DOI: 10.1109/ANTHOLOGY.2013.6784954
24. Ермаков А.В., Сучкова Л.И. Реализация протокола передачи данных между интеллектуальными автономными роботами. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019666759 от 13 декабря 2019 г.
25. Ермаков А. В., Сучкова Л. И. Проектирование сетевой коммуникационной среды для реализации управления в коллективе автономных роботов // Южно-Сибирский научный вестник. 2019. Т. 2. № 4 С. 28–31. DOI: 10.25699/SSSB.2019.28.48969
26. Ermakov A., Suchkova L. Development of Data Exchange Technology for Autonomous Robots Using a Self-Organizing Overlay Network // 2019 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). IEEE, 2019. P. 1–5. DOI: 10.1109/FarEastCon.2019.8934727
27. Половко А. М., Гуров С. В. Основы теории надежности: 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: БХВ-Петербург, 2006. 702 с.: ил. ISBN 5-94157-541-6

Сведения об авторах

Александр В. Ермаков – аспирант кафедры ИВТиИБ АлтГТУ, 656038, Российская Федерация, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, e-mail: tour0@ya.ru

Лариса И. Сучкова – доктор технических наук, проректор по учебной работе АлтГТУ, 656038, Российская Федерация, Алтайский край, г. Барнаул, пр. Ленина, 46, e-mail: li.suchkova@yandex.ru

Вклад в работу

Ермаков А.В. – обзор литературы, разработка алгоритмов.

Сучкова Л.И. – формализация требований и постановка задачи.

Применение методов машинного обучения для прогнозирования опасных отказов объектов железнодорожного пути

Игорь Б. Шубинский¹, Алексей М. Замышляев¹, Ольга Б. Проневич¹, Алексей Н. Игнатов², Евгений Н. Платонов^{2*}

¹АО «НИИАС», Российская Федерация, Москва, ²Московский авиационный институт, Российская Федерация, Москва

*en.platonov@gmail.com



Игорь Б.
Шубинский



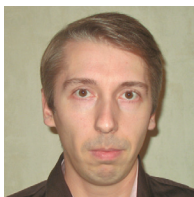
Алексей М.
Замышляев



Ольга Б. Проневич



Алексей Н.
Игнатов



Евгений Н.
Платонов

Резюме. Цель работы – уменьшение количества опасных событий на железнодорожном пути за счет разработки методологии прогнозирования редких опасных отказов на основе обработки больших массивов данных, поступающих в реальном масштабе времени от диагностических систем о каждом километре пути. Опасные отказы являются редкими событиями. Однако для железной дороги в целом ежегодно количество таких событий измеряется десятками и для эффективного управления безопасностью движения важно перейти от оценки вероятности появления опасного отказа как такового к определению наиболее вероятного места отказа. **Методы.** Задача выявления редких, но опасных возможных событий из сотен тысяч данных о не критичных отклонениях параметров железнодорожного пути не поддается решению традиционными методами статистической обработки. Прогнозирование опасных событий на основе указанной статистики осуществляется с помощью методов искусственного интеллекта. Для этого используются технологии анализа больших данных и Data Science. К таким технологиям относятся методы машинного обучения, решающие задачи классификации объектов на основе его характеристик (признаков, предикатов) и известных случаях реализации нежелательных событий. Применение различных алгоритмов машинного обучения демонстрируется на примере прогнозирования отказов верхнего строения пути по наблюдениям, собранным в период с 2014 г. по 2019 г. на Куйбышевской железной дороге. **Результаты/Выводы.** Результатом категорирования объектов является вывод о наиболее вероятном месте появления опасного отказа на железнодорожном пути. Такой вывод основан на анализе связей между случаями появления нежелательных событий и фактическими характеристиками объекта и условиями его эксплуатации. Практическое значение этой работы состоит в том, что предлагаемый набор методов и средств может рассматриваться как неотъемлемая часть системы принятия решений по техническому обслуживанию пути. Его можно легко адаптировать для функционирования в режиме онлайн и интегрировать с автоматизированной измерительной системой на базе транспортного средства.

Ключевые слова: машинное обучение, отказы объектов железнодорожного пути, решающие деревья.

Для цитирования: Шубинский И.Б., Замышляев А.М., Проневич О.Б., Платонов Е.Н., Игнатов А.Н. Применение методов машинного обучения для прогнозирования опасных отказов объектов железнодорожного пути // Надежность. 2020. № 2. С 43-53. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-2-43-53>

Поступила 29.02.2020 г. / После доработки 18.04.2020 г. / К печати 17.06.2020 г.

1. Введение

С каждым годом увеличивается роль цифровых технологий в управлении технологическими предприятиями. Автоматизированные системы управления (АСУ) позволяют существенно увеличить скорость выполнения операций на производстве, системы автопилотирования используются в поездах и самолетах, обеспечивая безопасность движения на скоростях, выходящих за грани человеческой реакции. Современные инструменты диагностики замечают то, что не способен увидеть человеческий глаз, и применяются в медицине, машиностроении, исследовании космоса и других областях науки и промышленности. Но цифровой мир не ограничивается автоматизацией процессов, которые не может выполнить человек, особенно, если дело касается крупных предприятий. Компания ОАО «РЖД» с 2016 года выстроила систему электронного документооборота более чем с тысячей предприятий, вовлеченных в процесс грузовых перевозок [1]. Только об электропоездах «Ласточка» диагностическая информация собирается с помощью 342 датчиков и измерительных устройств. В ОАО «РЖД» одновременно с системой диагностики состояния локомотивов функционируют десятки АСУ, обеспечивающих холдинг информации о состоянии железнодорожного пути [2, 3], оборудования железнодорожного электроснабжения [4], безопасности движения [5], о графиках исполнения движения [6] и множестве других объектов и процессов. Каждая из АСУ ОАО «РЖД» призвана решать отдельные задачи, но для комплексного управления железнодорожным транспортом были разработаны системы корпоративного уровня ЕКП УРРАН (Единая корпоративная платформа Управления Ресурсами, Рисками и Надежностью на стадиях жизненного цикла),

ЕК АСУИ (Единая корпоративная автоматизированная система управления инфраструктурой), ЕК АСУТР (Единая Корпоративная Автоматизированная Система Управления Трудовыми Ресурсами), ЕК АСУФР (Единая корпоративная автоматизированная система управления финансами и ресурсами). Существующие системы сбора и хранения данных, а также корпоративные системы, агрегирующие информацию из различных источников, обеспечивают ОАО «РЖД» возможность успешного применения технологий обработки и управления большими данными (Big Data) Data Science (рис. 1).

2. Актуальность прогнозирования появления опасных отказов верхнего строения пути

Высокая интенсивность движения поездов, высокая скорость движения на железнодорожной сети, условия окружающей среды, старение – все это вызывает износ железных дорог, в первую очередь – железнодорожного пути. Дефекты рельсов могут привести к сходу, аварии или крушению поезда. Такие опасные события сопровождаются повреждением железнодорожных путей, электросетей, а также вагонов и секций локомотив вплоть до их исключения из инвентарного парка [7]. Также может произойти выход сошедших подвижных единиц в габарит соседнего пути, что может привести к столкновению со встречным поездом и, как следствие, привести к катастрофическому ущербу от схода поезда [8, 9]. Большая доля нежелательных событий из-за состояния пути характерна не только для железных дорог России. За последнее десятилетие около трети всех железнодорожных происшествий в США были вызваны дефектами, связанными с железнодорожными путями [10].



Рис. 1. АСУ ОАО «РЖД» – основа для применения технологии анализа Big Data

При анализе сходов, аварий и крушений единиц подвижного состава грузового поезда было выявлено, что эти события, вызванные неисправностью железнодорожного пути, могли произойти на километре пути, оцененном, в частности, на «хорошо». В этой связи для прогноза состояния пути недостаточно агрегированной оценки состояния данного километра, здесь необходимо принимать в расчет другие параметры: количество уширений, рихтовок и др. Однако одного сбора дополнительных параметров недостаточно. Согласно исследованию [11], лишь часть данных о контролируемом объекте является полезной с точки зрения принятия решения при управлении конкретными событиями (рис. 2).

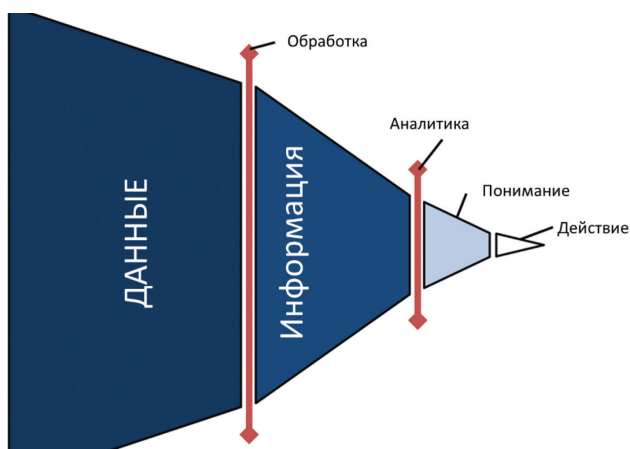


Рис. 2. Преобразование больших объемов необработанных данных в практическую информацию

Современные методы многофакторного анализа данных и технологии машинного обучения обеспечивают возможность включать в модели более 50 факторов. Они позволяют на основе текущих значений измеренных признаков, характеризующих состояние железнодорожного пути, делать вывод о необходимости и месте проведения срочных ремонтных работ, чтобы предотвратить отказы железнодорожного пути и сходы, аварии и крушения поездов. Об эффективности применения технологии анализа Big Data и Data Science можно говорить на основе имеющегося практического международного опыта, анализ которого приведен ниже.

3. Обзор методов машинного обучения и их применение в анализе дефектов железнодорожного пути

В настоящее время из-за быстрого технического прогресса и повсеместного развертывания недорогих датчиков, широкое использование беспроводных средств связи привело к повышению роли интернет-технологий в эффективной реализации стратегий технического обслуживания во многих отраслях. В железнодорожной отрасли также активно используются технологии Data Science [12].

За последние два десятилетия машинное обучение произвело революцию в широком спектре областей, таких, как компьютерное зрение, обработка естественного языка и распознавание речи. С ростом количества данных, собираемых устройствами мониторинга, такими, как беспроводные сенсорные сети или видеокамеры высокого разрешения, которые широко используются для проверки критически важной железнодорожной инфраструктуры, машинное обучение также приобретает все большую популярность для улучшения работы и повышения надежности железнодорожных систем, а также позволяет минимизировать ежедневные затраты на обслуживание [13].

Методы машинного обучения можно разделить на классические методы обучения [14] и методы глубокого обучения [15]. Основное различие между этими методами заключается в уровне их представления. К классическим методам обучения относятся метод главных компонент, метод опорных векторов [16], деревья решений [17], случайный лес [18–20], логистическая регрессия [21] и метод ближайших соседей [22].

В работе [23] представлена методология систематизации данных для мониторинга состояния рельса. Основное внимание авторы направили на выявление закономерностей появления отказов на кривых малого радиуса, используя метод главных компонент и данные, полученные в результате ручного осмотра от шведской железнодорожной сети.

В работе [24] использован метод опорных векторов для прогнозирования ситуации, когда не очень серьезные дефекты пути перерастают в более серьезные типы дефектов и отказы.

В работе [25] на основе решающих деревьев разработана система предварительного автоматического ранжирования инцидентов, которая по имеющимся признакам оценивает вероятность предостерегающего состояния объекта.

Цзян и соавторы [26] предложили гибридный подход к распознаванию усталости при качении по данным, полученным с помощью ультразвукового лазера.

В работе [10] метод главных компонент применен совместно с методом опорных векторов к набору данных из 31 объектов, собранных для железнодорожной сети I класса США для обнаружения четырех видов поверхностных дефектов.

В последнее время научное сообщество также использовало преимущества методов глубокого обучения для изучения дефектов рельсов. Исследователи полагают, что глубокое обучение может стать элементом полностью автоматизированных систем железнодорожного мониторинга [27].

Алгоритмы глубокого обучения, основанные на нейронных сетях, применяются в качестве основного инструмента для выявления структурных дефектов рельса. Наиболее широко используются сверточные нейронные сети (CNN). Это произошло благодаря широкому использованию видеокамер, которые обеспечивают

исследовательское сообщество огромным количеством данных и дают возможность использовать более сложные методы обучения. Однако CNN являются «черным ящиком» и практически не интерпретируются. Другими словами, исследователь машинного обучения не может объяснить, как модель CNN придумала свои прогнозы, или доказать их надежность для конечного пользователя.

В работе [28] на основе технологии CNN рассматриваются подходы к решению задачи автоматизированной обработки изображений верхнего строения железнодорожного пути (ВСП) с целью выявления зон, подозрительных на дефекты. За основу были взяты изображения, полученные одним из поездов Центра диагностики и мониторинга устройств инфраструктуры – структурного подразделения Западно-Сибирской железной дороги.

Ли и соавторы [29] использовали искусственные нейронные сети и метод опорных векторов для прогнозирования износа балластной призмы на основе таких факторов как кривизна, пропущенный тоннаж и др. При этом авторы заметили, что для получения стабильных прогнозов необходимо проводить измерения минимум два года.

Более подробный обзор применения различных методов машинного обучения к выявлению дефектов железнодорожного пути можно найти в обзоре [30].

Многообразие используемых моделей свидетельствует о том, что применение технологий машинного обучения в настоящее время является исследовательским процессом, включающим в себя этапы:

- анализ источников информации о состоянии железнодорожного пути;
- подготовка данных к машинному обучению;
- постановка задачи машинного обучения;
- обучение моделей;
- выбор лучшей модели;
- применение модели.

4. Алгоритм подготовки данных о состоянии железнодорожного пути для применения методов машинного обучения в ОАО «РЖД»

Для подготовки данных, получаемых из АСУ ОАО «РЖД» разработан алгоритм, включающий в себя 5 этапов, приведенных в табл. 1.

Одним из основных понятий машинного обучения является выборка. Выборка – конечный набор прецедентов (случаев, событий, испытуемых образцов и др.) и соответствующие им данные (характеристики объектов), образующие описание прецедента. Выборка, включающая в себя полный набор доступных данных, должна содержать в себе целевую переменную – показатель, прогноз значения которого и является основной целью применения методов машинного обучения. Кроме этого, выборка делится на две части: обучающую выборку и тестовую выборку. Алгоритм подготовки данных, полученных из АСУ ОАО «РЖД», для формирования выборок, используемых в машинном обучении приведен на рис. 3.

Таблица 1 – Этапы подготовки данных

Наименование этапа	Цель	Условия выполнения этапа	Критерии необходимости этапа
Очистка данных	Повышение качества моделирования за счет улучшения качества данных	Выполняется всегда	Выполняется всегда
Преобразование данных	Повышение качества моделирования за счет сопоставления последовательностей с различными физическими единицами и/или диапазонами значений	Выполняется при необходимости для дискретных последовательностей	1. Диапазоны изменения значений различных признаков отличаются более чем в 5 раз. 2. Различные физические единицы измерения признаков
Дискретизация данных	Расширение диапазона доступных для применения моделей	Выполняется при необходимости для непрерывных последовательностей	1. Целевой признак является непрерывной величиной, но необходимо оценить вероятность попадания в интервал 2. Планируется применять метод, который не может использовать непрерывные данные.
Очистка текстов	Повышение качества моделирования за счет улучшения качества данных	Выполняется при необходимости для непрерывных последовательностей	Планируется использовать информацию из текстов при моделировании
Формирование выборок	Проверка качества разработанных моделей	Выполняется всегда	Выполняется всегда

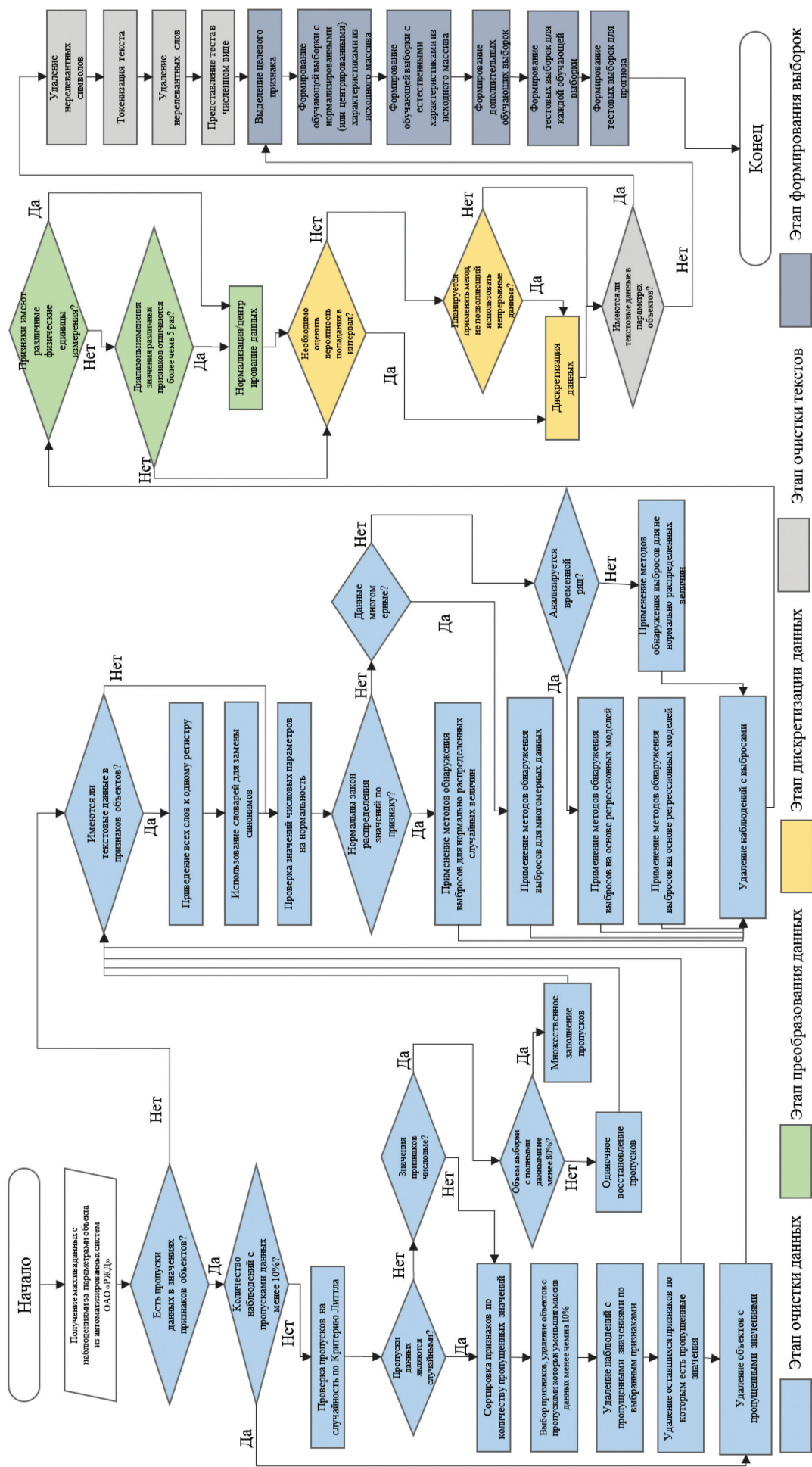


Рис. 3. Алгоритм подготовки данных, полученных из АСУ для формирования выборки, используемых в машинном обучении

5. Алгоритм применения методов машинного обучения для прогноза появления опасных отказов железнодорожного пути

Задачи машинного обучения обычно описываются в терминах того, как система машинного обучения должна обрабатывать обучающую выборку. В качестве прецедента обучающей выборки ВСП выбран километр ВСП, состояния которого характеризуются 77 параметрами, включая результаты диагностики, условия эксплуатации, качественные оценки. Значения этих параметров представляются в виде вектора $x \in R^n$, каждый элемент которого — значение признака.

Классификация — наиболее часто встречающаяся задача машинного обучения, она заключается в построении моделей, выполняющих отнесение интересующего нас объекта к одному из нескольких известных классов. В задачах этого типа алгоритм классификации должен ответить на вопрос, какой из категорий принадлежит объект. С точки зрения обеспечения безопасности движения каждый километр ВСП делится на два класса: 0 — километр с отсутствием опасного отказа ВСП, 1 — километр с опасным отказом ВСП.

На обучающей выборке подбирают наилучшие параметры для алгоритма классификации. На тестовой выборке вычисляют ошибку классификации для того, чтобы выбрать наилучший алгоритм.

Пусть X — пространство объектов, которые описываются набором признаков $X = \{X^1, \dots, X^n\}^T$; $Y = \{0, 1\}$ — множество допустимых откликов; $y^*: X \rightarrow Y$ — целевая зависимость, известная только на объектах обучающей выборке $Z^N = (x_i, y_i)_{i=1}^N$, где x_i — вектор значений признаков, а $y_i = y^*(x_i)$ — отклики целевой переменной, $i = 1, \dots, N$.

Задача обучения заключается в том, чтобы восстановить функциональную зависимость между объектами и откликами, то есть построить алгоритм $a: X \rightarrow Y$, аппроксимирующий целевую зависимость $y^*(\cdot)$ на всем множестве X , а не только на объектах обучающей выборки Z^N .

На рис. 4 приведен алгоритм применения шести основных методов машинного обучения для классификации километра ВСП.

6. Критерии выбора лучшей модели

Для анализа точности алгоритма машинного обучения и сравнения точности алгоритмов существуют различные меры.

Для задачи бинарной классификации введем следующие обозначения:

TP — количество правильно спрогнозированных объектов с категорией «1»;

FN — количество объектов с истинной категорией «1», но прогнозом «0»;

FP — количество объектов с истинной категорией «0», но прогнозом «1»;

TN — количество правильно спрогнозированных объ-

ектов с категорией «0».

Основными мерами качества для моделей бинарной классификации являются.

1) Общая точность алгоритма $AC = \frac{TP + TN}{TP + FP + FN + TN}$, определяющая общую эффективность алгоритма давать правильные ответы.

2) Ложная тревога $FPR = \frac{FP}{FP + TN}$, показывающая возможность алгоритма прогнозировать ложные отклонения от нормального состояния.

3) Точность алгоритма $PR = \frac{TP}{TP + FP}$, показывающая, какая доля объектов, распознанных как объекты с категорией «1», предсказана верно.

4) Полнота алгоритма $RE = \frac{TP}{TP + FN}$, показывающая, какая доля объектов действительно имеющих категорию «1», предсказана верно.

5) F -мера алгоритма $F = \frac{2 \cdot PR \cdot RE}{PR + RE}$ — среднее гармоническое точности и полноты.

6) Площадь под кривой ошибок AUC — глобальная характеристика качества, значения которой лежат в интервала от 0 до 1. Значение 0,5 соответствует случайному угадыванию, а значение 1 — безошибочному распознаванию. AUC является площадью под ROC-кривой. ROC-кривая показывает соотношение доли ложных положительных классификаций (FPR) и доли верных положительных классификаций (RE). ROC-кривая является достаточно сложной мерой точности алгоритма, более подробно с ней можно познакомиться в работе [31].

7. Численный эксперимент категорирования участков пути на основе прогноза появления отказа

Рассмотрим задачу классификации отказов для ВСП. Для предупреждения и предотвращения сходов, аварий и крушений состояние железнодорожного пути на сети железных дорог проверяется путеизмерителем на предмет отклонений от нормативных показателей. На основании полученных данных каждому километру железнодорожного пути присваивается определенная оценка: «неудовлетворительно», «удовлетворительно», «хорошо» и «отлично». Эти оценки должны сигнализировать об опасности возникновения транспортного происшествия, вызванного состоянием железнодорожного пути.

На Куйбышевской железной дороге в период с 2014 г. по 2019 г. собрана статистика по состоянию ВСП. Зарегистрированы отказы элементов железнодорожной инфраструктуры следующих видов: изолирующий стык, железобетонная шпала, рельсовая линия в целом, стыкование рельсов, геометрические параметры рельсовой

Табл. 2. Показатели качества моделей

	Показатель качества	Логистическая регрессия (выборка № 2)	Решающее дерево (выборка № 2)	Случайный лес (выборка № 2)	Метод опорных векторов (выборка № 2)	Метод ближайших соседей (выборка № 1)
1	AC	0,74	0,76	0,75	0,73	0,72
2	FPR	0,41	0,28	0,28	0,41	0,46
3	PR	0,78	0,94	0,94	0,94	0,89
5	RE	0,78	0,94	0,94	0,94	0,89
6	F-мера	0,78	0,86	0,86	0,94	0,88
7	AUC	0,68	0,83	0,83	0,76	0,71

колеи и т.д. Для каждого километра пути за несколько лет были проведены ежемесячные измерения следующих показателей: количество уширений, количество отклонений, количество рихтовок, количество просадок, скорость движения на данном километре и т.д.

Если на километре железнодорожного пути зафиксирован отказ, то отклику присваивается значение «1», если нет, то значение «0», то есть множество категорий имеет вид $Y=\{0,1\}$. Требуется решить задачу бинарной классификации по наблюдениям за прошлые моменты времени и проверить работоспособность алгоритма на наблюдениях за 2019 г. На основании проведенной классификации прогнозируется появление опасного отказа.

Получено 194328 результатов наблюдений за различными объектами (километрами железнодорожного пути). Из них зафиксировано 267 объектов с опасными отказами. Данные разбиты на обучающую выборку (192375 объектов, из них 257 с опасными отказами, данные за 2014-2018 гг.) и тестовую выборку (1953 объекта, из них 10 с опасными отказами, данные за январь 2019 г.).

Для решения задачи классификации использовано несколько алгоритмов машинного обучения: логистическая

регрессия, алгоритм на основе решающих деревьев, метод случайного леса, метод опорных векторов (SVM) и метод ближайших соседей (NNK).

Сформированы обучающие выборки:

- обучающая выборка № 1: наблюдения за 2014-2018 годы на стандартизированных данных;
- обучающая выборка № 2: наблюдения за 2017-2018 годы на стандартизированных данных.

Дополнительно проведена процедура прореживания данных. Цель – повышение качества моделирования за счет формирования сбалансированных обучающих выборок, в которых количество наблюдений с категорией «1» должно составлять не менее 40% от общего числа наблюдений.

Для отбора признаков использован метод рекурсивного отбора признака для каждого метода машинного обучения.

На рис. 5 приведено сравнение качества моделей, а в табл. 2 приведены показатели качества моделей. В табл. 2 приведены модели, обученные на выборках, которые дали лучшие показатели качества для своего типа модели.

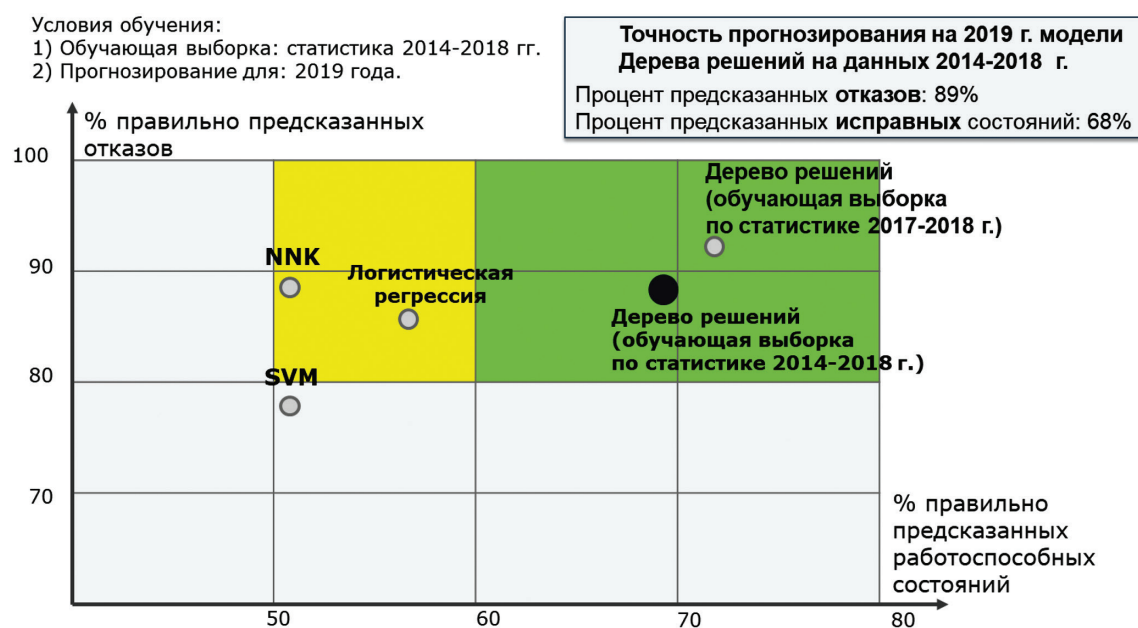


Рис. 5. Сравнение моделей по показателям качества

Табл. 3. Перечень объектов тестовой выборки в зоне недопустимого риска

Дата проверки	Дистанция пути	Эксплуатационный участок	Номер пути	Километр	Вероятность опасного отказа
29-JAN-19	9	2	1	979	0,55
29-JAN-19	9	1	1	969	0,51
14-JAN-19	9	2	1	979	0,48
14-JAN-19	9	1	1	969	0,48
29-JAN-19	9	2	1	1018	0,37
29-JAN-19	9	2	1	1003	0,28
14-JAN-19	9	2	1	1018	0,21
14-JAN-19	9	2	1	1003	0,17
23-JAN-19	20	1	1	36	0,003
25-JAN-19	20	2	1	36	0,0014

Результаты ранжирования моделей: ранг 1 – решающее дерево (обученное на выборке № 6), ранг 2 – случайный лес (обученный на выборке № 6).

В табл. 3 приведен перечень объектов верхнего строения пути, имеющих наибольшие вероятности опасного отказа (что соответствует наиболее высоким уровням риска) в январе 2019 г.

Анализ данных табл. 2 показывает, что для решения задачи классификации объектов наилучшие результаты могут быть получены в результате применения метода, основанного на решающих деревьях.

В последнем столбце табл. 3 приведена частота, с которой деревья решений классифицируют категорию объекта как «1», т.е. количество деревьев, определивших объект как «километр с опасным отказом ВСП» по отношению к общему числу построенных деревьев. По результатам работы алгоритма классификации для обучающей выборки необходимо выбрать порог значения вероятности отказа в зависимости от того, какая из ошибок классификации является приоритетной. Чем выше этот порог, тем реже объекты будут классифицироваться как «километр с опасным отказом» (величина ТР уменьшается, но увеличивается значение ТН). Чем порог ниже, тем меньше объектов «километр с опасным отказом» будет пропущено, но больше объектов с отсутствием опасного отказа («0») будет определено как имеющие опасный отказ («1») (возрастают значения ТР и FР). Для задачи классификации объектов ВСП важным является не пропустить возможный отказ. Пусть даже ценой увеличения количества объектов с отсутствием опасного отказа («0»), которые будут ложно определены как объекты с опасным отказом («1»).

По результатам классификации для обучающей выборки был выбран порог $\bar{p}=0,15$. На тестовой выборке это привело к тому, что из 10 объектов с опасным отказом 8 были классифицированы верно и 5 объектов без опасного отказа (с меткой «0») были также классифицированы как объекты с опасным отказом. Если бы

мы установили порог $\bar{p}=0,10$, то число правильно определенных объектов с опасным отказом («1») осталось бы неизменным, а число неверно классифицированных объектов без опасного отказа («0») увеличилось бы до 14. При $\bar{p}=0,001$ все десять объектов с опасным отказом («1») были бы классифицированы верно, но при этом число неверно определенных объектов без опасного отказа («0») возросло бы до 251.

8. Заключение

В статье представлена методологическая основа прогнозирования редких опасных событий (отказов), которая может быть практически развита и реализована в ЕКП УРРАН ОАО «РЖД» в качестве составной системы. Эта система путем обработки большого массива входных данных должна в режиме реального времени прогнозировать неблагоприятные события на железнодорожном транспорте на некотором горизонте времени. Наполнение этой системы: комплекс математических моделей и методов, а также метрик для проверки качества построенных моделей.

На основе задачи прогнозирования отказов железнодорожного пути в зависимости от различного набора факторов отработана последовательность действий для формирования решения о целесообразности проведения дополнительных ремонтных работ на том или ином участке пути. Для этой цели проведено сравнение моделей с использованием предложенных метрик. Результатом категорирования объектов являлся вывод о наличии ключевых индикаторов и их значений раннего предупреждения факторов риска. Такой вывод основан на анализе соответствия фактических характеристик объекта и условий его эксплуатации случаям появления нежелательных событий и случаям отсутствия нежелательных событий. Предлагаемый набор методов и средств можно легко интегрировать с автоматизированной измерительной системой на базе железнодорожного подвижного состава.

Библиографический список

1. Суконников Г.В. Применение технологии «интернет вещей» в ОАО «РЖД» [электронный ресурс] // Инновационный Дайджест: [сайт]. [2017]. URL: <http://www.rzd-expo.ru/innovation/novosti/1.pdf>
2. Бондаренко Ю.В., Куксо А.А., Маркевич И.Г. Информационные технологии в управлении системой диагностики железнодорожных путей // Сборник докладов IX международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 4 томах. 2018. С. 214–215.
3. Назаров Д.Г., Гура Д.А. О системах автоматизированного путеизмерительного контроля / Кубанский государственный технологический институт: Научные труды КУБГТУ. Краснодар, 2019. С. 135–146.
4. Куракина С.Г., Шмакова Е.Г. Автоматизация диагностики и мониторинга участников контактной сети на железных дорогах // Современные инновации. 2017. № 8(22). С. 15–17.
5. Замышляев А.М. Предпосылки для создания цифровой системы управления безопасностью движения // Надежность. 2019. № 4(71). С. 45–52.
6. Кузнецов Г.А., Крашенинников С.В., Крайсвитный В.П. и др. Модернизация системы ГИД «Урал-ВНИИЖТ» // Автоматика, связь, информатика. 2016. № 11. С. 15–19.
7. Замышляев А.М., Игнатов А.Н., Кибзун А.И. и др. Построение функциональной зависимости между рядом распределения количества вагонов в сходе и различными факторами движения // Надежность. 2018. Т. 18. № 1. С. 53–60.
8. Liu X., Saat M., Barkan C. Analysis of causes of major train derailment and their effect on accident rates // Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board. 2012. Vol. 2289. P. 154–163.
9. Замышляев А.М., Игнатов А.Н., Кибзун А.И. и др. О нарушении безопасности движения, связанном с выходом в габарит соседнего пути подвижных единиц грузового поезда, сошедших с рельсов // Надежность. 2018. Т. 18. № 3. С. 39–45.
10. Lasisi A., Attoh-Okine N. Principal components analysis and track quality index: a machine learning approach // Transp. Res. Part C. Emerg. Technol. 2018. Vol. 91. P. 230–248.
11. Dr. Allan M. Zarembski Better railroading through Big Data [электронный ресурс] // Railway age: [сайт]. [2018]. URL: <https://www.railwayage.com/analytics/better-railroading-through-big-data/>
12. Thaduri A., Galar D., Kumar U. Railway assets: a potential domain for big data analytics // Proc. Comput. Sci. 2015. Vol. 53. P. 457–467.
13. Li Q., Zhong Z., Liang Z. et al. Rail inspection meets big data: methods and trends. // 18th International Conference on Network-Based Information Systems. 2015. P. 302–308.
14. Флах П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных. М.: ДМК Пресс, 2015. 402 с.
15. Гудфеллоу Я., Бенджио И., Курвилль А. Глубокое обучение М.: ДМК Пресс, 2018. 652 с.
16. Widodo A., Yang B.S. Support vector machine in machine condition monitoring and fault diagnosis // Mech. Syst. Signal Process. 2007. Vol. 21. P. 2560–2574.
17. Sun W., Chen J., Li J. Decision tree and PCA-based fault diagnosis of rotating machinery // Mech. Syst. Signal Process. 2007. Vol. 21. P. 1300–1317.
18. Cerrada M., Zurita G., Cabrera D. et al. Fault diagnosis in spur gears based on genetic algorithm and random forest // Mech. Syst. Signal Process. 2016. Vol. 70–71. P. 87–103.
19. Santur Y., Karakose M., Akin E. Random forest based diagnosis approach for rail fault inspection in railways // National Conference on Electrical, Electronics and Biomedical Engineering. 2016. P. 714–719.
20. Чистяков С.П. Случайные леса: обзор // Труды Карельского научного центра РАН. 2013. № 1. С. 117–136.
21. Hosmer D., Lemeshov S., Sturdivant R.X. Applied Logistic Regression. New York: John Wiley & Sons, 2013. 528 p.
22. Samworth R.J. Optimal weighted nearest neighbour classifiers // Ann. Statist. 2012. Vol. 40. № 5. P. 2733–2763.
23. Famurewa S.M., Zhang L., Asplund M. Maintenance analytics for railway infrastructure decision support // Journal Qual. Maint. Eng. 2017. № 23. P. 310–325.
24. Hu C., Liu X. Modeling Track Geometry Degradation Using Support Vector Machine Technique // 2016 Joint Rail Conference. 2016.
25. Бойко П.Ю., Быков Е.М., Соколов Е.И., Яроцкий Д.А. Применение машинного обучения к ранжированию инцидентов на Московской железной дороге // Информационные технологии и вычислительные системы. 2017. № 2. С. 43–53.
26. Jiang Y., Wang H., Tian G. et al. Fast classification for rail defect depths using a hybrid intelligent method // Optik (Stuttgart). 2019. Vol. 180. P. 455–468.
27. Gibert X., Patel V.M., Chellappa R. Deep multitask learning for railway track inspection // IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 2017. Vol. 18. P. 153–164.
28. Резницкий М.А., Аршинский Л.В. Программная реализация автоматизированной системы обнаружения дефектов верхнего строения пути на основе технологии свёрточных нейронных сетей // Молодая наука Сибири: электрон. науч. журн. 2018. № 1.
29. Lee J.S., Hwang S.H., Choi I.Y. et al. Prediction of track deterioration using maintenance data and machine learning schemes // J. Transp. Eng. Part A Syst. 2018. Vol. 144. P. 04018045-1:9.
30. Nakhaee M.C., Hiemstra D., Stoelinga M. et al. The Recent Applications of Machine Learning in Rail Track Maintenance: A Survey // Lecture Notes in Computer Science. 2019. P. 91–105.
31. Fawcett T. An introduction to ROC analysis // Pattern Recognition Letters. 2006. Vol. 27. P. 861–874.

Сведения об авторах

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

Алексей М. Замышляев – доктор технических наук, заместитель Генерального директора АО «НИИАС», Москва, Российская Федерация, тел. +7 (495) 967-77-02, e-mail: A.Zamyshlaev@vniias.ru

Ольга Б. Проневич – начальник отдела АО «НИИАС», Москва, Российская Федерация, тел. +7 (985) 242-21-62, e-mail: oesune@rambler.ru

Алексей Н. Игнатов – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель, Московский Авиационный институт, Москва, Российская Федерация, тел. +7 (906) 059-50-00, e-mail: alexei.ignatov1@gmail.com

Евгений Н. Платонов – кандидат физико-математических наук, доцент, Московский Авиационный институт, факультет «Прикладной математики и физики», Москва, Российская Федерация, тел. +7 (499) 158-45-60, e-mail: en.platonov@gmail.com

Вклад авторов в статью

Шубинский И.Б. – формулировка требований к содержанию алгоритма подготовки данных для формирования выборки, целей каждого этапа. Формулировка требований к классификации методов машинного обучения на основании возможностей интерпретации результатов моделирования.

Замышляев А.М. – постановка цели работы, анализ проблемы и актуальности применения методов машинного обучения для прогнозирования появления опасных отказов верхнего строения пути, формирование выводов.

Проневич О.Б. – разработка алгоритма подготовки данных о состоянии железнодорожного пути для применения методов машинного обучения, алгоритма применения методов машинного обучения для прогноза появления опасных отказов железнодорожного пути.

Игнатов А.Н. – предварительная обработка и анализ данных для расчета.

Платонов Е.Н. – обзор методов машинного обучения и их применение в анализе дефектов железнодорожного пути. Постановка задачи классификации.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 20-07-00046А).

Перспективы повышения функциональной безопасности систем железнодорожной автоматики и телемеханики в условиях цифровизации

Алексей В. Озеров, АО «НИИАС», Российская Федерация, Москва



Алексей В. Озеров

Резюме. Цель. Современное состояние развития микропроцессорных систем управления и обеспечения безопасности движения поездов характеризуется высокими требованиями, предъявляемыми к надежности, технической безопасности и кибербезопасности данных систем в условиях, когда цифровая трансформация и задачи повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта настойчиво требуют перехода к новым парадигмам проектирования, тестирования, верификации, валидации и стандартизации для ускорения процесса разработки и внедрения. Предполагается, что при сохранении уровня надежности и безопасности, по крайней мере, не хуже текущего, должно быть обеспечено максимальное использование инновационных решений и цифровых инструментов, направленных на дальнейшую автоматизацию систем управления с целью повышения пропускной способности железных дорог и производительности систем, минимизации влияния человеческого фактора и сокращения числа отказов и простоев. Важнейшими факторами при этом являются обеспечение интероперабельности (технической и эксплуатационной совместимости) систем и технологической независимости железнодорожных операторов и владельцев инфраструктуры от разработчика/поставщика устройств и систем железнодорожной автоматики. **Методы.** В работе дается обзор современного состояния развития микропроцессорных систем управления и обеспечения безопасности движения поездов на примере Европейского Союза и проводится системный анализ вопросов обеспечения надежности и безопасности данных систем в условиях перехода к новым уровням автоматизации. **Результаты.** Проведено рассмотрение эволюции систем управления и обеспечения безопасности движения поездов в Европейском Союзе на примере Европейской железнодорожной системы управления (ERTMS). Выполнен анализ общих тенденций и подходов к проектированию, тестированию, верификации, валидации и стандартизации железнодорожных систем управления. Рассмотрены основные научно-исследовательские и опытно-конструкторские программы развития железнодорожных систем управления ЕС с учетом используемых методологических подходов к обеспечению надежности и безопасности. Особое внимание уделено методам открытого проектирования, средствам удаленного лабораторного тестирования и стандартизации интерфейсов железнодорожной системы управления ERTMS. **Выводы.** В условиях цифровой трансформации развитие современных микропроцессорных систем на железнодорожном транспорте предполагает ускоренное внедрение целого ряда инновационных решений и широкое использование коммерческих продуктов (COTS), что в итоге делает системы более сложными и может влиять на показатели надежности. В целях сохранения этих показателей на заданном уровне и минимизации влияния человеческого фактора железнодорожное сообщество все шире использует на всех этапах жизненного цикла системы формальные методы и автоматизированные средства проектирования, диагностики и мониторинга. Важнейшим фактором для обеспечения надежности является стандартизация архитектуры, интерфейсов, открытых программных средств разработки и тестирования систем, в том числе, стандартизация подходов к удаленному лабораторному тестированию продуктов разных производителей для подтверждения безотказности работы на границах систем разных производителей.

Ключевые слова: системы управления, железнодорожная сигнализация, интервальное регулирование движения поездов, надежность, безопасность, TSI, ERTMS/ETCS, GoA4, человеческий фактор, формальные методы, верификация, валидация, сертификация, омологация, тестирование.

Для цитирования: Озеров А.В. Вопросы надежности систем управления и обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте в контексте цифровизации // Надежность. 2020. № 2. С. 54-64. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2020-20-2-54-64>

Поступила 18.02.2020 г. / После доработки 21.04.2020 г. / К печати 17.06.2020 г.

1. Введение

Современное состояние развития микропроцессорных систем управления и обеспечения безопасности движения поездов характеризуется высокими требованиями, предъявляемыми к надежности, технической безопасности и кибербезопасности данных систем в условиях, когда цифровая трансформация и задачи повышения конкурентоспособности железнодорожного транспорта настойчиво требуют перехода к новым парадигмам проектирования, тестирования, верификации, валидации и стандартизации для ускорения процесса разработки и внедрения. Предполагается, что при сохранении уровня надежности и безопасности, по крайней мере, не хуже текущего, должно быть обеспечено максимальное использование инновационных решений и цифровых инструментов, направленных на дальнейшую автоматизацию систем управления с целью повышения пропускной способности железных дорог и производительности систем, минимизации влияния человеческого фактора и сокращения числа отказов и простоев. Важнейшими факторами также являются обеспечение

интероперабельности (технической и эксплуатационной совместимости) систем и технологической независимости железнодорожных операторов и владельцев инфраструктуры от разработчика/поставщика устройств и систем железнодорожной автоматики.

Строго говоря, цифровая трансформация применительно к железнодорожным системам управления предполагает переход к новой парадигме управления 4.0. С точки зрения базового принципа интервального регулирования движения поездов, это означает эволюцию от простого разделения попутно следующих поездов сначала по времени, потом с помощью безопасного расстояния (фиксированный блок-участок) с переходом к управлению по радиоканалу (как в Европейской железнодорожной системе управления ERTMS) и к динамически регулируемому интервалу следования (вплоть до сближения поездов на небезопасное расстояние по принципу «виртуальной сцепки», по аналогии с автомобильным транспортом). Такой переход влечет за собой целый набор нормативных, регуляторных, технологических и технических изменений [1].



Рис. 1. Организация работы железнодорожного транспорта

Одним из существенных факторов, обуславливающих необходимость изменения методологических подходов к проектированию и эксплуатации систем управления и обеспечения безопасности движения поездов, является последовательное повышение уровня автоматизации управления подвижным составом (ПС) в направлении целевого состояния, декларируемого в общеевропейских программах инновационного развития и предполагающего переход к полностью беспилотным технологиям управления подвижным составом, т.е. без машиниста (так называемый уровень GoA4, или Grade of Automation, согласно стандарту МЭК 62290) [2].

Это значительно повышает значимость вопросов обеспечения надежности и безопасности на всех уровнях управления перевозочным процессом, где в настоящее время по-прежнему большую роль играет человеческий фактор, и особенно на уровне критически важных (ответственных) систем, связанных с безопасностью движения (рис. 1).

2. Требования интероперабельности ЕС и нормирование показателей надежности

Исторически сложилось так, что практически в каждой стране свои нормативные требования и правила эксплуатации железных дорог, а нередко и разная железнодорожная колея. Так, в Европе до образования Евросоюза функционировало более двадцати разных национальных железнодорожных систем управления и обеспечения безопасности движения поездов, устанавливаемых как на инфраструктуре, так и на борту поезда, а также собственные системы сертификации и омологации. После образования Евросоюза и открытия трансевропейских транспортных коридоров TEN-T на первый план вышли вопросы интероперабельности (технической и эксплуатационной совместимости) железнодорожных систем и инфраструктуры и создания единой системы сертификации и омологации (так называемая «система взаимного признания сертификатов» – или cross acceptance).

Впоследствии в ЕС были утверждены разработанные Европейским железнодорожным агентством (ERA) так называемые «Директивы интероперабельности» и «Технические спецификации интероперабельности» (Technical Specification for Interoperability, или TSI, для всех элементов железнодорожной системы, включая единую железнодорожную систему управления ERTMS). В директивах интероперабельность определяется как способность железнодорожной системы обеспечивать безопасное движение поездов без замены или переключения оборудования на участках стыкования с достижением требуемых уровней эксплуатационных показателей [3].

Актуальной версией TSI применительно к системам управления и обеспечения безопасности движения поездов (TSI relating to Control-Command and

Signalling – TSI CCS) является версия от 2016 года [4]. В данной спецификации нормируются требования совместимости бортового и напольного оборудования ERTMS, интерфейсы с внешними подсистемами и, в том числе, показатели безотказности, эксплуатационной готовности, ремонтпригодности и безопасности (RAMS). Требования совместимости опираются на корпус спецификаций функциональных требований к подсистемам и интерфейсам системы ERTMS, разрабатываемых промышленной группой UNISIG, объединяющей ведущих производителей оборудования железнодорожной автоматики, под эгидой ERA (так называемые Subsets).

Система ERTMS имеет три базовых элемента:

1. GSM-R (Global System for Mobiles – Railway) – система радиосвязи, построенная на специально выделенных частотах публичной сети радиосвязи GSM и предназначенная как для голосовой коммуникации между машинистами и диспетчерами, так и для передачи данных ETCS (между бортовым локомотивным устройством безопасности EVC – «Европейским безопасным компьютером» – и стационарным вычислительным управляющим комплексом RBC – «центром радиоблокировки»).

2. ETCS (European Train Control System) – система сигнализации, которая отвечает за контроль скорости, формирование и исполнение разрешений на движение, обмен информацией с устройствами электрической централизации стрелок и сигналов на железнодорожных станциях.

3. ETML (European Traffic Management Layer) – уровень управления поездопотоками на основе графиков движения, предназначенный для оптимизации движения поездов по участкам с учетом поездной информации в режиме реального времени.

Система ERTMS/ETCS имеет три варианта или уровня. Если говорить упрощенно, то уровень 1 представляет собой управление по светофорам и путевым приемопередатчикам (бализам), без использования радиоканала GSM-R и, соответственно, центра радиоблокировки RBC; уровень 2 – управление по радиоканалу GSM-R и, соответственно, с использованием центра радиоблокировки RBC, а также бализ в качестве реперных точек для целей навигации (это наиболее широко внедряемый вариант системы как в Европе, так и за ее пределами, – на данный момент оборудовано не менее 100 тыс. км железных дорог); уровень 3 предполагает дополнительное использование бортовых средств позиционирования и контроля целостности подвижного состава и реализацию принципа «подвижных блок-участков». Система ERTMS/ETCS уровень 3 до сих пор носит пока экспериментальный характер, разрабатывается и тестируется в виде гибридных решений с использованием спутниковой навигации, виртуальных бализ и цифровой карты маршрута.

Согласно спецификации Subset-026 («Спецификация системных требований») «эталонная» архитектура

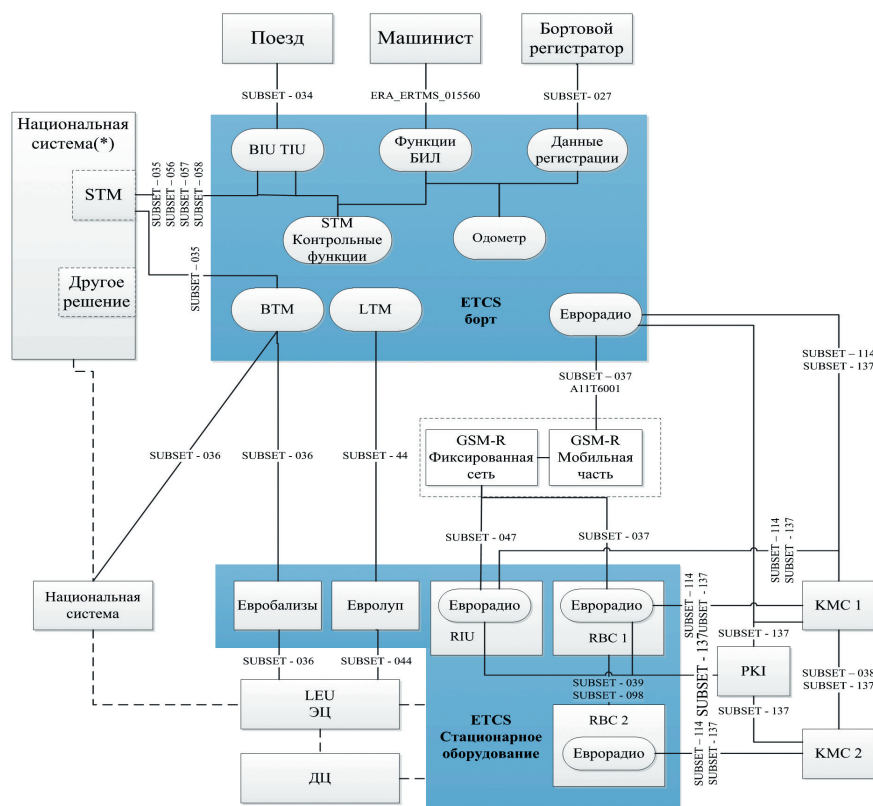


Рис. 2. Эталонная архитектура системы ERTMS/ETCS с указанием спецификаций интерфейсов

системы ERTMS/ETCS выглядит следующим образом (рис. 2) [5].

Пунктирной линией на схеме отмечены до сих пор не стандартизированные интерфейсы, и в этом случае применяются проприетарные (закрытые) протоколы и решения производителей. Это в особенности касается увязки центра радиоблокировки RBC с устройствами электрической централизации (ЭЦ) на станциях и оборудованием диспетчерской централизации (ДЦ), а также сопряжения между собой центров радиоблокировки RBC разных производителей. Это влечет за собой проблемы, связанные как с обеспечением интероперабельности, так и с обеспечением заданных показателей RAMS.

Кроме перечня обязательных технических спецификаций на подсистемы и интерфейсы системы ERTMS, TSI CCS содержит перечень обязательных стандартов, на соответствие требованиям которых должно сертифицироваться оборудование ERTMS, а именно:

1. EN 50126 «Железнодорожные применения. Спецификация и демонстрация безотказности, эксплуатационной готовности, ремонтпригодности и безопасности (RAMS)».
2. EN 50128 «Железнодорожные применения. Системы связи, сигнализации и обработки данных. Программное обеспечение для систем управления и обеспечения безопасности на железных дорогах».
3. EN 50129 «Железнодорожные применения. Системы связи, сигнализации и обработки данных.

Электронные системы сигнализации, связанные с безопасностью».

4. EN 50159 «Железнодорожные применения. Системы связи, сигнализации и обработки данных».

Согласно стандартам CENELEC, проектирование, верификация/валидация и сертификация подсистем ERTMS/ETCS с точки зрения программного обеспечения должны обеспечиваться на трех уровнях (рис. 3).



Рис. 3. Слои программного обеспечения

Если взять ключевой элемент системы ERTMS/ETCS уровень 2 – центр радиоблокировки RBC, то первый слой RBC – это программное ядро, в котором реализована безопасная логика и которое является единым и неизменным программным продуктом для всех железных дорог, на которых он применяется (сертифицируется однократно в уполномоченном органе ЕС, если впоследствии не вносятся изменения); второй слой (так называемое «технологическое программное обеспечение») интегрирует в себя логику и правила сигнализации той страны, для которой предполагается применение продукта, и является единым для всех применений продукта на железных дорогах данной страны (требует процедуры омологации для каждой страны); третий слой – это специфическая конфигурация логики сигнализации с топографической привязкой к конкретному железнодорожному участку (требует процедуры омологации для каждого участка).

В итоге нормативная пирамида системы ERTMS/ETCS в схематичном виде выглядит следующим образом (рис. 4).

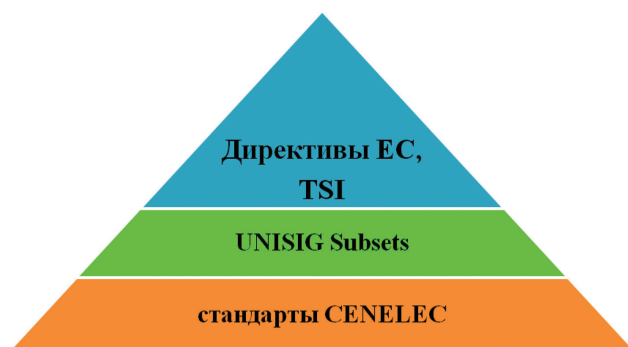


Рис. 4. Нормативная пирамида системы ERTMS/ETCS

3. Надежность системы ERTMS/ETCS

Стандарты, описывающие методологию RAMS, были разработаны еще во второй половине 90-х годов прошлого века Европейским комитетом электротехнической стандартизации CENELEC. Они используют комплексный подход к управлению показателями RAM, которые имеют непосредственное отношение к надежности системы, и безопасности (S) объектов железнодорожного транспорта на основе оценки рисков с учетом этапов жизненного цикла (V-образная модель).

Стандарты базируются на вероятностном подходе и используют как количественные показатели, так и рекомендации по обеспечению заданных показателей RAMS за счет применения апробированных методов (например, методы программирования, автоматизированного тестирования ПО и выявления ошибок и отказов). Изначально такой подход использовался в других отраслях промышленности – в атомной энергетике, авиации и космонавтике, откуда и был позаимствован [6].

Сертификация системы ERTMS/ETCS на соответствие стандартам CENELEC предполагает большой перечень мероприятий в области обеспечения надежности и безопасности (RAMS), т.е. подготовку и ведение значительного корпуса документов на всех этапах жизненного цикла системы, а также строгое соблюдение независимости друг от друга разработчика, верификатора/валидатора и оценщика системы с обязательным обеспечением менеджмента качества производства (аудит производства).

Документация RAM включает в себя программу обеспечения RAM и отчет о выполнении программы RAM (расчет внутренней надежности, листы планового и внепланового технического обслуживания).

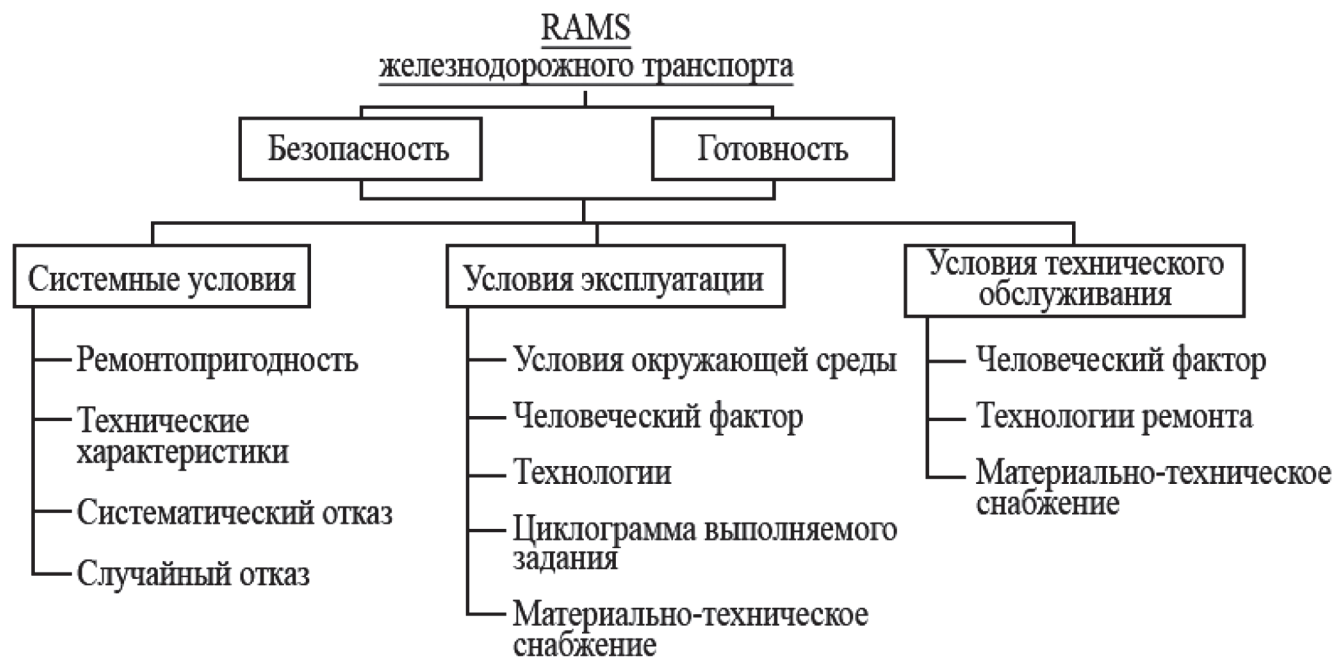


Рис. 5. Факторы, влияющие на RAMS (упрощенная схема на основе EN 50126)

Для сохранения надежности и эксплуатационных характеристик системы на этапах ее жизненного цикла должны определяться факторы, влияющие на показатели RAMS, анализироваться и оцениваться последствия их влияния, использоваться мероприятия по управлению ими, предусмотренные в стандартах.

Согласно EN 50126, характеристики RAMS железнодорожной системы подвержены тройному влиянию:

- ошибки и отказы, которые проявляют себя внутри системы на любом этапе жизненного цикла системы;
- мешающие влияния, которым подвергается система во время эксплуатации;
- ошибки, которым подвергается система во время работ по техническому обслуживанию.

При этом эти три источника влияния могут взаимодействовать между собой. Эффективное управление этими факторами позволяет сохранять показатели RAMS на заданном уровне. В упрощенном виде взаимосвязанность факторов, влияющих на надежность и безопасность, представлена на рис. 5 [7].

Эксплуатационные требования к системе управления и обеспечения безопасности на железнодорожном транспорте специфичны для каждой системы и определяются по соглашению между производителем и владельцем инфраструктуры на этапе разработки системы. Для системы в целом определены следующие три типа отказов:

- отказ, вызывающий остановку движения (по меньшей мере, два поезда вынуждены двигаться по условиям видимости);
- эксплуатационный отказ (не более одного поезда вынуждены двигаться по условиям видимости);
- незначительный отказ (требует внепланового ремонта, но не подпадает под предыдущие категории).

В документе «ERTMS/ETCS RAMS requirements specification» (1998), к примеру, приводятся следующие конкретные параметры [8]:

- вероятность задержки движения по причине отказов системы сигнализации не должна превышать 0,018, а вероятность отказов системы ERTMS/ETCS должна быть не выше 0,0027;
- допустимая средняя задержка на поезд по причине отказа ERTMS/ETCS в конце поездки средней продолжительности 90 мин. должна быть не выше 10 мин.;
- эксплуатационная готовность при любых причинах отказа должна быть не ниже 0,99973;
- отказы, приводящие к остановке поезда, не должны превышать 10% от всего количества отказов, влияющих на надежность системы; сервисные отказы не должны превышать 90% от всего количества отказов, влияющих на надежность системы;
- среднее время восстановления системы – 1,737 часа для распределенного напольного оборудования.

При этом следует отметить, что система ERTMS/ETCS уровень 2, как правило, работает как оверлейная система, то есть устанавливается поверх национальной системы сигнализации и использует последнюю в качестве резервной системы в случае отказа. В литературе

часто дискутируется вопрос о необходимости использования дополнительных устройств и систем для повышения надежности основной системы сигнализации [9].

План обеспечения RAM системы ERTMS/ETCS должен, как минимум, включать в себя следующие мероприятия:

- системные условия и циклограмма выполняемого задания;
- периодические ревизии плана обеспечения RAM;
- моделирование, прогнозирование и пропорциональное распределение показателей безотказности;
- анализ видов, последствий и критичности отказов (FMECA);
- анализ безотказности программного обеспечения;
- анализ и верификация эксплуатационных показателей надежности;
- анализ превентивного технического обслуживания;
- анализ корректирующего технического обслуживания;
- планы по изолированию и поиску неисправностей;
- программа развития/повышения безотказности;
- предварительные тесты ремонтпригодности;
- демонстрационные тесты безотказности;
- демонстрационные тесты ремонтпригодности;
- система анализа отчетности об отказах и корректирующих воздействиях (FRACAS).

Разумеется, важнейшим фактором, влияющим на показатели RAMS системы, является человеческий фактор – причем как на этапе проектирования, так и на этапе эксплуатации. Поскольку человек может оказать большое влияние на RAMS, достижение заданных показателей RAMS железнодорожного транспорта требует более строгого учета человеческого фактора, чем в других отраслях. Этим также объясняются усилия, предпринимаемые железнодорожным сообществом по автоматизации как процесса эксплуатации и технического обслуживания, так и процессов проектирования, тестирования, верификации и валидации, особенно в контексте общего курса на цифровизацию и внедрения принципов Индустрии 4.0.

4. Новые подходы и требования

Как показывает анализ программных документов железнодорожных органов и ассоциаций ЕС и Международного союза железных дорог (МСЖД), главный мотивационный фактор поиска новых подходов и решений в железнодорожной отрасли в условиях цифровой трансформации – низкая скорость внедрения инноваций, обусловленная длительным периодом сертификации и омологации, который во многом связан с наличием проприетарных решений, отсутствием стандартизированных протоколов и интерфейсов, а также стандартизированных методов автоматизированного проектирования. Это влечет за собой высокие расходы на разработку и внедрение систем, их эксплуатацию и техническое обслуживание, быстрое устаревание систем, а также

технологическую зависимость от поставщика. Кроме того, это влияет на надежность и безопасность систем управления.

Для решения этих проблем в ЕС создано в 2014 г. и функционирует совместное предприятие Shift2Rail (с совокупным бюджетом – 900 млн евро) [10]. Это масштабная комплексная программа инновационного развития железнодорожного транспорта, объединяющая производителей железнодорожной техники, железнодорожных операторов и владельцев инфраструктуры. Ее основная цель заключается в разработке, интеграции, демонстрации и валидации инновационных цифровых технологий для железной дороги в целях повышения ее привлекательности для потребителей (отсюда и само название инициативы, буквально означающее «перезагрузка на железную дорогу»).

К основным целевым показателям программы Shift2Rail относятся следующие:

- сокращение стоимости жизненного цикла объектов железнодорожного транспорта на 50%;
- увеличение пропускной способности существующей железнодорожной инфраструктуры в 2 раза;
- повышение надежности транспортных услуг и точности соблюдения графика на 50%.

В основе изменения подходов к заданию и подтверждению RAMS и, как следующий этап, к сертификации продукции лежат требования бизнеса, соображения, связанные с сокращением затрат на разработку, сертификацию и омологацию продукции, а также с сокращением времени от разработки продукции до вывода на рынок и времени ее внедрения на конкретном объекте железнодорожного транспорта. Не удивительно, что в рамках проектов программы Shift2Rail рассматриваются и изучаются различные методы автоматизации процесса разработки, верификации и валидации, тестирования, в том числе те, которые используются в других отраслях промышленности – в первую очередь, в авиационной и автомобильной промышленности.

На основе выбранных и стандартизированных в дальнейшем методов планируется даже переход к «виртуальной» сертификации. Под виртуальной сертификацией понимают максимально допустимое использование объективных свидетельств, получаемых путем имитационного моделирования и виртуального тестирования на основе формальных моделей, для подтверждения соответствия продукта заявленным требованиям в процессе сертификации и омологации [11]. Данная методология исследуется, например, в рамках одного из проектов Shift2Rail – PLASA 2. Цель – добиться существенного сокращения времени на стыковку с уже установленными системами и проведение тестирования в полевых условиях за счет стандартизации интерфейсов, использования формальных методов проектирования, верификации и удаленного лабораторного тестирования.

В принципе, уже в стандарте EN 50128 рекомендовано использование полуформальных и формальных методов проектирования и автоматизированных средств тести-

рования, верификации и валидации, но реальная работа в этом направлении пока далека от завершения в плане выбора и стандартизации соответствующих методов и средств [12].

По мнению автора [13], подход к обеспечению качества разработки программного обеспечения, представленный в стандарте CENELEC, не может сам по себе гарантировать «корректность» работы микропроцессорной системы. Формальные методы как раз и стали применяться для того, чтобы повысить «качество разработки» и снизить стоимость жизненного цикла критически важных микропроцессорных систем железнодорожной автоматики, в первую очередь, электрической централизации. Основное преимущество методов в том, что они позволяют дать исчерпывающий анализ всех возможных сценариев поведения программируемой системы и обеспечить консистентность между формализованным поведением модели и поведением встроеного в систему программного кода.

5. История и дальнейшее применение формальных методов

История применения формальных методов в стандартизации систем железнодорожной сигнализации берет свое начало в 1997 году, когда МСЖД опубликовал отчет о проекте Европейского института железнодорожных исследований (ERRI), в котором был проведен подробный анализ правил функционирования систем электрической централизации и предлагалась гармонизация функциональных требований к системам сигнализации на основе формальных подходов. В дальнейшем в рамках рабочей группы МСЖД был разработан полуформальный метод под названием EURIS («Европейская спецификация железнодорожной централизации»), определяющий «строительные блоки» (светофор, путь, стрелка) и описывающий операции с каждым блоком с использованием диаграмм технологических процессов. В проекте МСЖД EURO-INTERLOCKING (1998–2008) формализованные требования к системе электрической централизации были конвертированы в модель, визуализируемую с использованием компьютерной программы. Выяснилось, что для такой работы требуются одновременно знания инженера в области железнодорожной автоматики и специалиста в области компьютерного моделирования. Кроме того, стало очевидно, что это процесс итерационный и требует дальнейшего совершенствования модели как с точки зрения улучшения качества вербализации требований, так и с точки зрения их полноты [14].

Работа была продолжена в рамках проекта EULYNX, в котором на основе моделей SysML ведется формализация описания интерфейсов напольных систем сигнализации разных производителей, включая подсистемы ERTMS/ETCS, для сокращения времени разработки и программно-аппаратной стыковки между собой. В развитие данных подходов ассоциацией разработчиков EUG («Группа пользователей ERTMS») и консорциумом

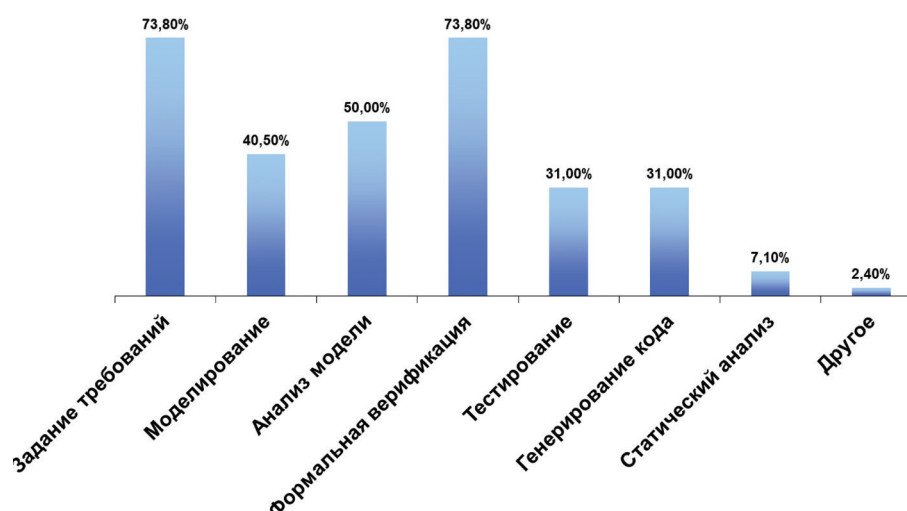


Рис. 6. Применение формальных методов на этапах ЖЦ системы

EULYNX был инициирован проект RCA (Reference CCS Architecture), направленный на разработку эталонной архитектуры системы ETCS нового поколения с интегрированными функциями автоведения (возможностью миграции к уровню GoA4), гармонизацию компонентов и стандартизацию интерфейсов и протоколов обмена на основе использования формальных методов. В 2019 году была выпущена альфа-версия описания будущей архитектуры [15].

Параллельно с проектом RCA по инициативе владельцев железнодорожной инфраструктуры ведущих европейских стран (Германии, Франции, Швейцарии, Нидерландов и др.) был создан консорциум OCORA (Open CCS Onboard Reference Architecture), который ставит перед собой задачи разработать и стандартизировать открытую модульную бортовую платформу ETC нового поколения. Участники OCORA опираются на подходы EULYNX и RCA и также ориентируются на требования новой версии CCS TSI, выход которой планируется в 2022 году. Целью проекта OCORA является обеспечение технологической независимости от производителя (модульность, интероперабельность, заменяемость, модифицируемость компонентов системы, киберзащищенность, удобство эксплуатации) за счет создания новой открытой шины и стандартизации протоколов обмена всех модулей с максимальным использованием существующих промышленных стандартов. Ожидается, что такой подход позволит добиться, среди прочего, и заметного повышения эксплуатационных показателей системы, складывающихся из показателей безотказности, эксплуатационной готовности, ремонтпригодности и безопасности, в том числе киберзащищенности. В соответствии с программным документом проекта, результатом работы консорциума станет полный и логически связанный набор спецификаций, а также новейшие рекомендации по интеграции, верификации и валидации бортовой системы с максимальным использованием автоматизированных средств тестирования и формальных методов [16].

В рамках проекта ASTRail, входящего в программу Shift2Rail, исследователи из группы FMT (формальные методы и средства), созданной на базе Института информационной науки и технологий (ISTI) Итальянского национального исследовательского совета (CNR) провели анализ и оценку основных языков и средств формального моделирования и верификации, используемых в железнодорожной области. В ходе исследования, к примеру, выяснилось [17], что наиболее часто в литературе упоминаются следующие автоматизированные

Табл. 1 – Перечень проектов ЕС в области железнодорожной сигнализации

Проект	ERTMS/ETCS/CBTC
CRYSTAL	http://www.crystal-artemis.eu/
Deploy	http://www.deploy-project.eu/
DITTO	http://cs.swansea.ac.uk/dittorailway/
EuRailCheck	https://es.fbk.eu/projects/eurailcheck-era-formalization-and-validation-etcs
MBAT	http://www.mbat-artemis.eu/home/69-abstract.html
OpenCOSS	http://www.opencoss-project.eu
OpenETCS	http://openetcs.org/
PERFECT	https://trimis.ec.europa.eu/project/performing-enhanced-rail-formal-engineering-constraints-traceability
	Распределенная железнодорожная сигнализация
SafeCap	http://gow.epsrc.ac.uk/NGBOView-Grant.aspx?GrantRef=EP/I010807/1
	Система централизации
ADVANCE	http://www.advance-ict.eu/
EULYNX	https://eulynx.eu/
EuroInterlocking	http://test.swissrequirementsengineering.ch/en/projects/euro-interlocking-project
INESS	http://www.iness.eu
RobustRail	http://www.robustrails.man.dtu.dk

системы проектирования: Simulink, NuSMV, AtelierB, Prover, ProB, SCADE, IBM Rational Software Architect, Polyspace, S3.

Проведенные опросы показали, что разработчики используют указанные или другие автоматизированные инструменты для следующих целей (рис. 6).

Как видно из результатов опроса, чаще всего формальные методы применяются на этапах задания требований (спецификации) и верификации системы. Стандартизации подходов к написанию спецификаций функциональных и технических требований к системе (FRS, SRS), а также верификации на основе формальных методов посвящен целый ряд проектов в ЕС, не считая самой программы Shift2Rail. Так, с 1998 года по настоящее время можно насчитать не менее 14 проектов ЕС в области железнодорожной сигнализации, посвященных данной тематике. Подробное описание всех этих проектов в рамках данной статьи, по понятным причинам, не представляется возможным, поэтому просто перечислим их (табл. 1).

Детальный анализ традиционных и формальных методов верификации представлен в работе [18]. Как правило, в процессе верификации критически важной системы, такой как система ERTMS/ETCS, используется взаимосвязанный набор методов и средств, который в

настоящее время все чаще учитывает не только параметры RAMS, но и параметры киберзащищенности (еще одна область, подлежащая стандартизации в рамках железнодорожной отрасли, рис. 7).

Подробный анализ возможностей дискретно-событийного моделирования применительно к этапам жизненного цикла системы ERTMS/ETCS, в особенности на этапе верификации, представлен также в работе [19]. Автор указывает, что система ERTMS/ETCS характеризуется тем, что состояния системы дискретны, а механизм перехода состояний обусловлен событиями. Современные методы проектирования не позволяют гарантировать, что ответственная система, связанная с безопасностью, будет полностью соответствовать требованиям и вести себя безопасно, а потому крайне важно интегрировать процессы верификации на как можно более раннем этапе разработки системы. Это можно сделать за счет использования формальных языков и методов проектирования.

Существует большое число формальных методов, и им присущ ряд преимуществ:

- формальные репрезентации обладают точной семантикой, лишенной неопределенности или двусмысленности;

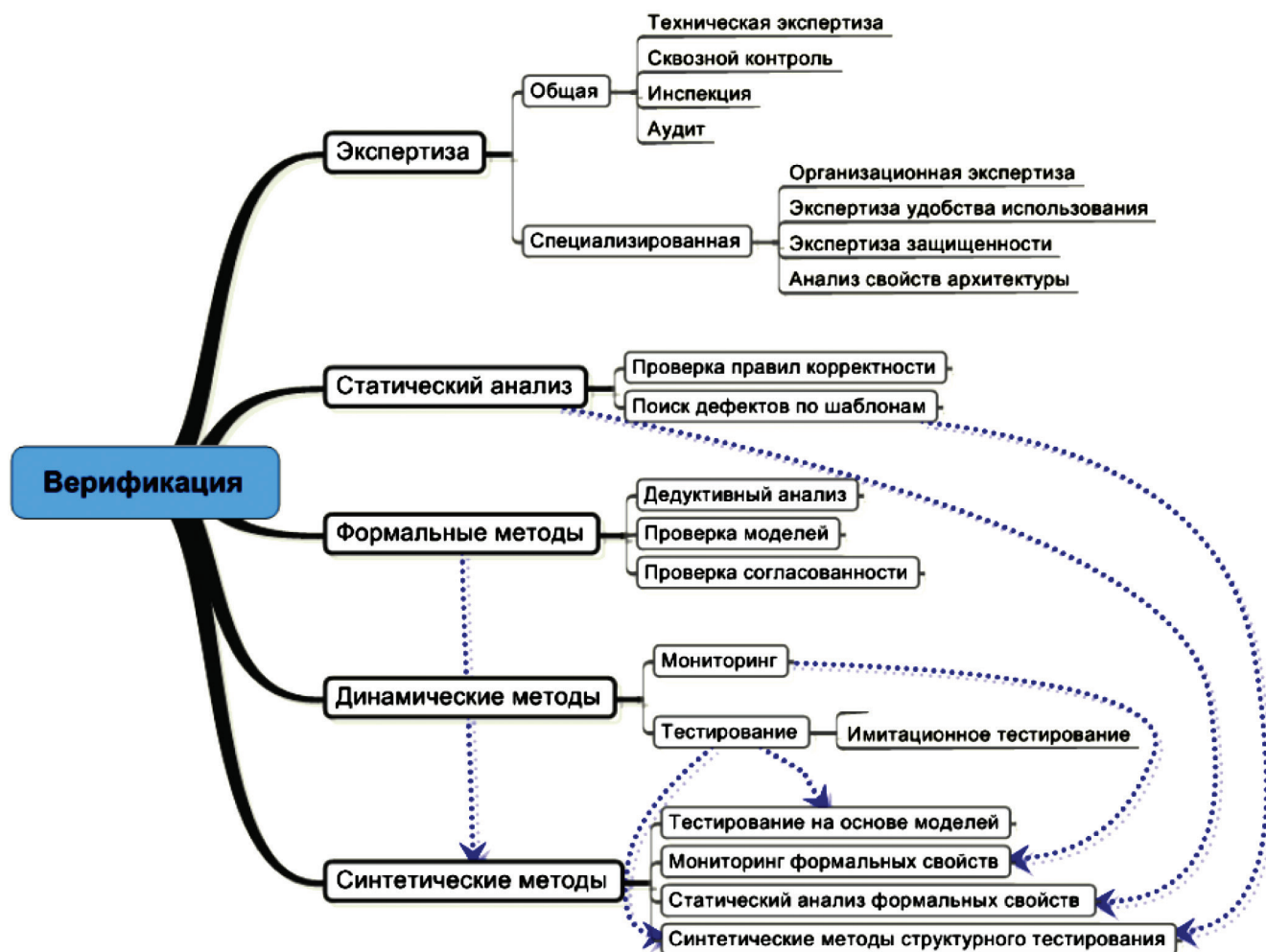


Рис. 7. Комбинированное использование методов верификации

- формальные модели могут быть верифицированы математически, а значит, их корректность может быть доказана;

- формальные модели могут читаться компьютерами, а, следовательно, процесс разработки системы может быть автоматизирован.

В идеале, применение формальных методов позволяет не только избежать небезопасных переходов системы, но и минимизировать число вносимых человеком ошибок, а следовательно, и отказов системы, что непосредственно влияет на ее надежность.

Важнейшим разделом программы Shift2Rail является блок инновационного развития IP2, среди задач которого – создание автоматизированных средств имитационного моделирования и лабораторного тестирования (в том числе, удаленного) для сокращения необходимости проведения интеграционных и валидационных тестов на объектах железнодорожного транспорта (так называемое «нулевое тестирование на месте установки» – «Zero on-site testing»).

По мнению авторов программы Shift2Rail [20], сегодняшняя ситуация в области тестирования систем управления и обеспечения безопасности характеризуется следующим образом:

- в большинстве случаев производители тестируют свою продукцию в лабораторных условиях;

- тестирование системы производится в лаборатории, но по-прежнему значительная часть тестов осуществляется на месте установки;

- тестирование на месте установки зачастую используется как резервное на тот случай, если лабораторное тестирование не завершено вовремя;

- лабораторное тестирование, как правило, производится в нестандартизованных условиях по принятым в компании правилам;

- увязка с оборудованием других производителей всегда вызывает необходимость использования сложных интерфейсных устройств, которые нельзя повторно использовать в последующих проектах;

- результаты тестирования не соотносимы между собой, поскольку применяются разные подходы на основе проприетарных решений.

В итоге, с точки зрения целевых задач программы Shift2Rail и ее проектов, предполагается обеспечить стандартизацию подходов на всех этапах жизненного цикла системы ERTMS/ETCS с учетом необходимости внедрения инновационных решений типа «подвижного блок-участка», «виртуальной сцепки», технического зрения в рамках реализации уровня автоматизации GoA4, будущего стандарта железнодорожной радиосвязи FRMCS, разрабатываемого под эгидой МСЖД на базе IP-протокола, взамен устаревшего стандарта GSM-R. Результаты проектов должны быть положены в основу новых требований интероперабельности обновленной версии CCS TSI 2022 года, а также, возможно, рекомендаций для внесения изменений в стандарты CENELEC.

6. Заключение

В условиях цифровой трансформации развитие современных микропроцессорных систем на железнодорожном транспорте предполагает ускоренное внедрение целого ряда инновационных решений и широкое использование коммерческих продуктов (COTS), что в итоге делает системы более сложными и может влиять на показатели надежности. В целях сохранения этих показателей на заданном уровне и минимизации влияния человеческого фактора железнодорожное сообщество все шире использует на всех этапах жизненного цикла системы формальные методы и автоматизированные средства проектирования, диагностики и мониторинга.

Важнейшим фактором для обеспечения надежности является стандартизация архитектуры, интерфейсов, открытых программных средств разработки и тестирования систем, в том числе стандартизация подходов к удаленному лабораторному тестированию продуктов разных производителей для подтверждения безотказности работы на границах систем разных производителей. Возможное создание в перспективе единой открытой онтологии систем управления и обеспечения безопасности движения поездов и стандартизованных методов и средств разработки, тестирования и технического обслуживания на основе принципов интероперабельности и технологической независимости от производителя может обеспечить железнодорожному транспорту заметное конкурентное преимущество по сравнению с другими видами транспорта.

Разумеется, есть и другое большое направление исследований и практических работ, которое никак не затронуто в настоящей статье, связанное с использованием цифровых датчиков и цифровых моделей, а также комплексных информационных систем для мониторинга и прогнозирования показателей надежности системы, определения предотказных состояний на основе формального описания и имитационного моделирования возможных сценариев развития с применением технологии Data Science и Big Data. Но это уже тема для отдельной статьи.

Библиографический список

1. Doppelbauer J. Command and Control 4.0. // IRSE News, Issue 246, July/August 2018.
2. IEC 62290:2014. Railway applications – Urban guided transport management and command/control systems.
3. Interoperability Directive 2008/57/EC.
4. CCS (EU) No. 2016/919: Technical Specification of Interoperability relating to Control-Command and Signalling.
5. UNISIG Subset-026-2_v360.
6. Замышляев А.М. Прикладные информационные системы управления надежностью, безопасностью, рисками и ресурсами на железнодорожном транспорте. Ульяновск: Печатный двор, 2013. 140 с.

7. BS EN 50126:1999. Railway applications – The specification and demonstration of Reliability, Availability, Maintainability and Safety (RAMS).

8. EUG. ERTMS/ETCS RAMS Requirements Specification, 1998.

9. Rumsey A. Achieving high levels of signalling system availability – is there a role for secondary systems? // IRSE News, Issue 247, September 2018.

10. Официальный сайт европейской инициативы Shift2Rail [Электронный ресурс]. URL: <https://Shift2Rail.org/> (дата обращения 14.04.2020 г.)

11. Shift2Rail Plasa 2. Deliverable D 4.1: Virtual Certification: State of the art, gap analysis and barriers identification, benefits for the Rail Industry, 2019, p. 9.

12. BS EN 50128:2011. Railway applications – Communication, signalling and processing systems – Software for railway control and protection systems.

13. Antoni M. Formal Validation Method and Tools for French Computerized Railway Interlocking Systems // IRJ. 2009. Vol. 2. No. 3. P. 99-106.

14. Van der Werff M., Elswiler B., Luttik B., Hendriks P. The use of formal methods in standardisation of interfaces of signalling systems // IRSE News, Issue 256, June 2019.

15. EUG, EULYNX. RCA Alpha – Architecture Overview, 2019.

16. OCORA Architecture – Alpha Release, 2019.

17. Shift2Rail ASTRail. D4.1 / Report on Analysis and on Ranking of Formal Methods. 2019. P. 26.

18. Estevan A.M. Dependability and safety evaluation of railway signalling systems based on field data. Doctoral thesis, Lulea, 2015.

19. Xie Y. Formal Modeling and Verification of Train Control Systems. Thesis, 2019.

20. Shift2Rail Multi-Annual Plan. 2015. P. 249.

Сведения об авторе

Алексей В. Озеров – начальник Международного управления АО «НИИАС», Москва, Российская Федерация, тел. +7 (495) 967-77-02, e-mail: A.Ozerov@vniias.ru

Вклад автора в статью

Озеров А.В. проанализировал основные параметры систем управления и обеспечения безопасности движения поездов на примере системы ERTMS/ETCS с учетом требований обеспечения надежности и безопасности на основе международных нормативных документов и стандартов, определил основные направления развития подходов в области проектирования, сертификации и омологации в условиях цифровой трансформации и перехода к новым парадигмам внедрения инноваций.



<http://www.gnedenko.net>

Дорогие коллеги!

В 2005 году была основана неформальная Ассоциация специалистов по надежности, прикладной вероятности и статистике (I.G.O.R.), которая имеет свой сайт в Интернете GNEDENKO FORUM. Сайт назван в честь выдающегося математика Бориса Владимировича Гнеденко (1912-1995). Целью Форума является улучшение профессиональных и персональных контактов специалистов по математической статистике, теории вероятностей и их важных ветвей, как Теория надежности и контроля качества, Теория массового обслуживания, Теории управления запасами и т.п.

Начиная с января 2006 года Форум издает ежеквартальный Международный электронный журнал

«Надежность: Теория и приложения» (“Reliability: Theory & Applications”).

Журнал зарегистрирован в Библиотеке Конгресса США (ISSN 1932-2321). Все права сохраняются за авторами, так что статьи затем могут быть свободно опубликованы в любых других изданиях или представлены на конференции.



**Вступайте в Форум
Гнеденко!**

**Добро
пожаловать!**

В наших рядах уже более
500 специалистов
из **44** стран мира.

Для вступления в
Форум присылайте
фото и краткое резюме
по адресу:

к.т.н. Александр Бочков,
a.bochkov@gmail.com

Membership is free.

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 ссылка на формулу, то такая формула обязательно набирается отдельной строкой, по правому краю которой указывается номер формулы в круглых скобках, например:

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

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

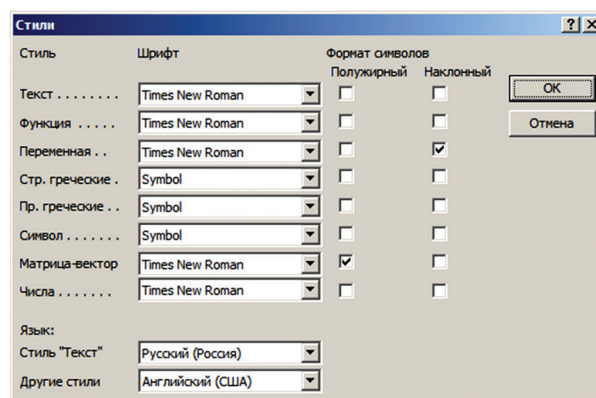
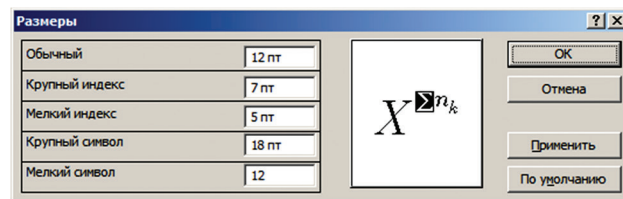
Простые формулы следует набирать без применения формульного редактора (использовать в MS Word русские и латинские буквы, а также меню «Вставка» + «Символ», если требуются греческие буквы и математические операторы), с соблюдением требуемого наклона для латинских символов, например:

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

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

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

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



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

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

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

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

8) Благодарности

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

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

Оформление:

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

9) Библиографический список

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

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

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

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

В описании каждого источника должны быть представлены все авторы.

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

Оформление:

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

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

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

10) Сведения об авторах

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

Оформление:

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

11) Вклад авторов в статью

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

Оформление:

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

12) Конфликт интересов

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

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

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

Оформление:

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

ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ ПРИ УЧАСТИИ И ПОДДЕРЖКЕ

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



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



Цели:

- ☐ эффективность,
- ☐ безопасность
- ☐ надежность перевозок



Основные направления деятельности

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



www.vniias.ru