НАДЕЖНОСТЬ

ISSN 1729-2646
e-ISSN 2500-3909

ТОМ **22**, №**2**

2022

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

В НОМЕРЕ

- НАДЕЖНОСТЬ ТРАНСПОРТИРУЮЩИХ СИСТЕМ ВОДООТВЕДЕНИЯ КРУПНЫХ ГОРОДОВ
- АНАЛИЗ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ С ПОМОЩЬЮ СИГНАТУР. ВЫЧИСЛЕНИЕ СИГНАТУРЫ СЛОЖНОЙ СТРУКТУРЫ
- ФОРМИРОВАНИЕ ДИАГРАММ СОСТОЯНИЙ-ПЕРЕХОДОВ В УСЛОВИЯХ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
- УЛУЧШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЦЕНОК ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ ПЛАНОВ ИСПЫТАНИЙ ОДНОРОДНОЙ ПРОДУКЦИИ
- ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДОВ BIG DATA В ОБЛАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
- ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ДЕФОРМАЦИИ ЭМОЦИОНАЛЬНОГО ОПЫТА ПИЛОТА В ОСОБЫХ СИТУАЦИЯХ ПОЛЕТА
- МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МОДЕЛИ МНОГОМЕРНОГО ОЦЕНИВАНИЯ ПРИВЯЗНЫХ ВЫСОТНЫХ ПЛАТФОРМ НА БАЗЕ МУЛЬТИКОПТЕРОВ
- ОЦЕНКА ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНОГО СИГНАЛА ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ПО ЦЕПЯМ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ И СОСРЕДОТОЧЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

НИИАС

Информатизация, автоматизация и связь на железнодорожном транспорте

www.vniias.ru

НИИАС

ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ПУБЛИКАЦИЙ В ЖУРНАЛЕ «НАДЕЖНОСТЬ»

СТРУКТУРНАЯ НАДЕЖНОСТЬ
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

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

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ НАДЕЖНОСТЬ
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

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

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СИСТЕМ
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

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

ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТЬ СИСТЕМ
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

- Методы пассивной защиты от отказов, математические модели структурного резервирования, постепенной деградации избыточных систем, маскирования неисправностей, практические результаты применения пассивной защиты от отказов.
- Методы активной защиты от структурных отказов и ошибок в выполнении информационных процессов, принципы и способы активной защиты, теоретические основы активной защиты, технические решения, оценки эффективности активной защиты.

УПРАВЛЕНИЕ РИСКАМИ
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

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

СЕРТИФИКАЦИЯ И СТАНДАРТИЗАЦИЯ
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

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

ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ
ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

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

ЖУРНАЛ ВКЛЮЧЕН В ПЕРЕЧЕНЬ ВЕДУЩИХ ЖУРНАЛОВ И ИЗДАНИЙ ВЫСШЕЙ АТТЕСТАЦИОННОЙ КОМИССИИ (ВАК)

Надежность
Префикс DOI: 10.21683
ISSN 1729-2646
e-ISSN 2500-3909

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Главный редактор:

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

Заместители главного редактора:

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

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

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

Технический редактор:

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

Председатель редакционного совета:

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

Сопредседатель редакционного совета:

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

УЧРЕДИТЕЛИ ЖУРНАЛА:
АО «НИИАС», НП «ОПЖТ»,
Шубинский И.Б.

Зарегистрирован в Министерстве Российской Федерации по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Регистрационное свидетельство ПИ № ФС77-46055 от 05 августа 2011 года.

Официальный печатный орган Российской академии надежности

Издатель журнала
ООО «Журнал «Надежность»
Генеральный директор
Дубровская А.З.
Адрес: 109029, г. Москва,
ул. Нижегородская, д. 27, стр. 1, оф. 209
ООО «Журнал «Надежность»
www.dependability.ru
Отпечатано в ООО «Отмара. нет». 107140,
г. Москва, Верхняя Красносельская, 2/1, стр. 2,
этаж 2, пом II, ком. 2А, 2Б

Подписано в печать 17.06.2022
Объем , Тираж 500 экз, Заказ №
Формат 60x90/8, Бумага глянец

Журнал издается ежеквартально с 2001 года,
стоимость одного экземпляра 1595 руб.,
годовой подписки 6380 руб.,
телефон редакции 8 (495) 967-77-05,
e-mail: dependability@bk.ru

Статьи рецензируются.
Статьи опубликованы в авторской редакции.

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

СОДЕРЖАНИЕ

Системный анализ. Структурная надежность

Баранов Л.А., Ермолин Ю.А. Надежность транспортирующих систем водоотведения крупных городов 3

Чепурко В.А., Черняев А.Н. Анализ структурных схем с помощью сигнатур. Вычисление сигнатуры сложной структуры 10

Зеленцов Б.П. Формирование диаграмм состояний-переходов в условиях мониторинга технического состояния 22

Михайлов В.С. Улучшение эффективности оценок показателей надежности различных планов испытаний однородной продукции 30

Функциональная безопасность. Искусственный интеллект

Розенберг Е.Н, Ольшанский А.М, Озеров А.В., Сафронов Р.А. Об использовании методов Big Data в области обеспечения функциональной безопасности 38

Функциональная надежность

Алтухова Е.В., Ариничева О.В., Малишевский А.В. Исследование моделей деформации эмоционального опыта пилота в особых ситуациях полета 47

Микони С.В., Полтавский А.В., Семенов С.С. Методология проектирования модели многомерного оценивания привязных высотных платформ на базе мультикоптеров 55

Батраев В.П., Батраев В.В. Оценка характеристик импульсного сигнала при передаче по цепям с распределенными и сосредоточенными параметрами 64

Гнеденко – Форум 72

Оригинальная статья / Original article
https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-3-9

Надежность транспортирующих систем водоотведения крупных городов

Dependability of water disposal systems of major cities

Леонид А. Баранов[1], Юрий А. Ермолин[1*]
Leonid A. Baranov[1], Yuri A. Yermolin[1*]
[1]*Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Российская Федерация*
[1]*Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation*
[*]*ermolin.y@yandex.ru*

Леонид А. Баранов

Юрий А. Ермолин

Резюме. Цель *этой статьи состоит в разработке аналитической методики вычисления показателя надежности специфической древовидной транспортирующей сети – системы водоотведения сточных вод крупного города.* **Методы.** *В качестве меры надежности канализационной сети в целом предлагается рассматривать относительный объем сточной воды, сбрасываемой из канализационной сети в окружающую среду вследствие отказов ее элементов. Эта статья представляет простую и удобную методику вычисления этого объема. В основе этой методики лежит представление древовидной канализационной сети в виде комбинации Y-образных фрагментов, названных структурообразующими элементами. Каждый такой элемент формально заменяется его фиктивным эквивалентом с интенсивностью отказов, рассчитываемой из условия равенства объемов неочищенного сброса сточной воды реального и фиктивного элементов. Последовательное применение такого подхода сводит задачу оценки объема сбрасываемых стоков к элементарным подзадачам, решение которых находится методами теории вероятностей.* **Результаты.** *Определение показателя эксплуатационной надежности сводится к рекуррентной пошаговой процедуре эквивалентирования Y-образных фрагментов сети, на каждом шаге которой результаты расчетов на предыдущей стадии используются в качестве исходных данных. Каждый такой шаг, начиная от входов сети, приводит к новой (виртуальной) сети, в отношении которой процедура повторяется. Процесс эквивалентирования заканчивается, когда исходная сеть оказывается представленной всего одним фиктивным элементом, для которого показатель надежности определяется элементарно.* **Заключение.** *Разработана методика расчета показателя эксплуатационной надежности древовидной канализационной сети крупного города, удобная для применения. Перечислены некоторые практические задачи, при решении которых предлагаемая методика была бы продуктивна. Сформулированы направления перспективных исследований в этом направлении.*

Abstract. *The* **Aim** *of the paper is to develop an analytical procedure for calculating the dependability indicator of a specific tree-like transporting network, i.e., the water disposal system of a major city.* **Methods.** *It is suggested using the relative volume of sewage water released from a sewage system into the environment as the result of the failure of the former's components as the measure of dependability. This paper presents a simple and convenient method for calculating such volume. The method is based on the representation of a tree-like sewage network as a combination of Y fragments referred to as structural elements. Every such element is formally replaced with its pseudo equivalent with a failure rate calculated assuming that the volumes of untreated waste water released by actual and fictitious elements are equal. A consistent application of this approach reduces the problem of estimation of the volume of released waste water to elementary subproblems that are solved using probability methods.* **Results.** *The problem of identifying the operational dependability indicator comes down to a recurrent stepwise procedure for equalization of Y fragments of the network, at each step of which the calculation data from the preceding step are used as the input data. Each such step, starting from the entry network, leads to another (virtual) network, for which the procedure repeats. The equalization process ends when the original network is represented by only one pseudo element, for which the dependability indicator is defined in an elementary way.* **Conclusion.** *The authors developed a convenient method for calculating the operational dependability indicator of a tree-like sewer network of a major city. Some practical problems are referred to that can be solved using the proposed method. Future lines of research in the domain were identified.*

Ключевые слова: *древовидная канализационная сеть, показатель надежности, Y-образный фрагмент, эквивалентирование, пошаговая процедура.*
Keywords: *tree-like sewer network; dependability indicator; Y fragment; equalization; stepwise procedure.*

Для цитирования: *Баранов Л.А., Ермолин Ю.А. Надежность транспортирующих систем водоотведения крупных городов // Надежность. 2022. №2. С. 3-9. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-3-9*
For citation: *Baranov L.A., Yermolin Yu.A. Dependability of water disposal systems of major cities. Dependability 2022;2:3-9. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-3-9*

Поступила *02.03.2022 г.* / **После доработки** *28.04.2022 г.* / **К печати** *17.06.2022 г.*
Received on: *02.03.2022* / **Revised on:** *28.04.2022* / **For printing:** *17.06.2022.*

Современное состояние науки и техники открывает большие возможности не только для внедрения прогрессивных достижений в конкретные производства, но и, в ряде случаев, является основой для разработки новых исследовательских технологий изучения различных объектов и систем промышленности, транспорта, коммунального хозяйства и т.п. инфраструктур. Развитие вычислительной техники, использование искусственного интеллекта, возможность оперативной обработки больших массивов информации (Big Data) иногда позволяют взглянуть на изучаемые, казалось бы, хорошо известные процессы с нетрадиционной точки зрения, и предложить более эффективные способы управления ими. При этом «ревизии», подчас, могут быть подвергнуты даже критерии, по которым это управление (понимаемое в широком смысле) осуществляется.

Примером такого подхода к изучению объекта может служить городская канализационная сеть, рассматриваемая далее с точки зрения надежности ее функционирования.

Система водоотведения города (особенно, крупного) является одной из важнейших инфраструктур, определяющих условия его нормального функционирования. Помимо производственной сферы, состояние городской системы водоотведения (канализации) самым непосредственным образом влияет на качество жизни буквально каждого человека, обеспечивая ему современный уровень комфортного обитания и сохранение здоровья. Существует небезосновательная точка зрения, объясняющая относительные успехи в борьбе с инфекционными болезнями, периодически уносившими жизни значительной части населения средневековой Европы, именно с изобретением и строительством канализации по схемам, основные принципы которых, развиваясь и совершенствуясь, сохранились до сих пор.

Назначением системы водоотведения является сбор и транспортировка сточных вод от мест их образования к очистным сооружениям по канализационной сети города. Как правило, такая сеть строится по напорно-самотечному принципу. Это означает, что сточная вода от мест ее образования по системе магистралей (труб, каналов, коллекторов), уложенных под землей с определенными уклонами, транспортируется самотеком, а в местах, где по условиям рельефа местности самотек невозможен, поднимается на более высокие отметки канализационными насосными станциями (КНС), после чего самотек продолжается. Количество КНС различной мощности для крупного города, занимающего большую территорию, может достигать нескольких десятков (например, в Москве их более 100). Вся сточная вода доставляется в итоге на очистные сооружения, где подвергается соответствующей обработке, после чего, очищенной, сбрасывается в естественный водоем [1].

Городская система водоотведения может быть отнесена к классу древовидных транспортирующих сетей [2, 3]. В качестве визуальной модели ей соответствует односвязный, ациклический граф, имеющий множество входных вершин (места образования сточных вод), единственный выход (очистные сооружения) и промежуточные вершины – точки соединений однородных участков транспортирующих магистралей: участков труб, каналов, коллекторов, насосных станций – ребер графа (рис. 1).

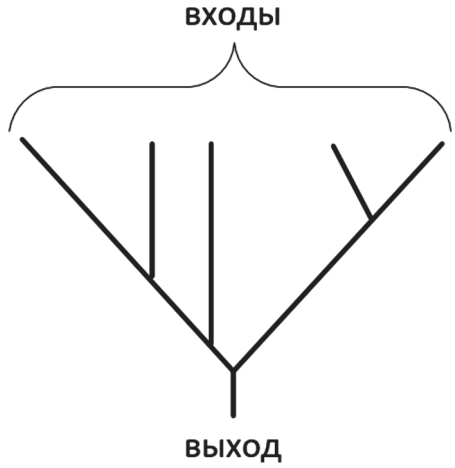


Рис. 1. Граф, отображающий канализационную сеть города

Примерами других объектов, также выполняющих «собирательную» функцию и относящихся к этому же классу, могут служить сети нефте- и газопроводов, доставляющие добываемый продукт от скважин к магистральному трубопроводу, подъездные пути к сортировочным горкам крупных железнодорожных станций, главные конвейеры сборочных производств и т.п. Несмотря на различия физических процессов, происходящих в таких системах, их древовидная конфигурация позволяет, по крайней мере, в некоторых случаях, сформулировать и рассмотреть некие специфические подходы к изучению подобных объектов.

Важнейшим свойством любого технического объекта является его надежность [4]. Ниже, на примере

городской системы водоотведения, предлагается один из возможных подходов к оценке надежности древовидных транспортирующих сетей, использующий именно их структурные особенности.

Надежность любого технического объекта принято оценивать некоторыми количественными показателями, такими, например, как среднее время наработки между отказами, вероятность безотказной работы за заданное время, коэффициент готовности и т.п. [4, 5]. В большинстве случаев каждый из таких показателей имеет ясный смысл, однозначно трактуется физически и не противоречит обыденным представлениям о степени надежности объекта. Когда же речь идет о надежности канализационной сети города, эти показатели либо вообще не применимы, либо трудно интерпретируемы и требуют уточняющих дополнительных пояснений и комментариев, т.е. теряют свою объективность [6-8]. Так, например, формальное утверждение «Вероятность безотказной работы канализационной сети города в течение года равна (цифра)», при его углубленном осмыслении с учетом специфики функционирования сети, практически никакой информации о ее надежности не несет. В силу этого, нахождение альтернативных показателей надежности городской канализационной сети как единого объекта, которые бы отличались большей информативностью и удобством использования при решении практических задач, непреходяще остается одной из актуальных проблем [9].

В процессе функционирования канализационной сети ее элементы (трубы, каналы, коллекторы) в случайные моменты времени выходят из строя, ремонтируются и вновь вступают в работу. Каждая авария влечет за собой некоторый объем сточной воды, сбрасываемой из поврежденного элемента на поверхность. В результате часть воды, поступившей на входы сети, не доставляется к ее выходу, т.е. сеть частично перестает выполнять свою функцию: транспортировать *всю* сточную воду к очистным сооружениям, что можно трактовать как снижение надежности процесса водоотведения в целом. Имея это в виду, в [10] предложено количественно оценивать надежность городской канализационной сети показателем эксплуатационной надежности γ, рассчитываемым по выражению:

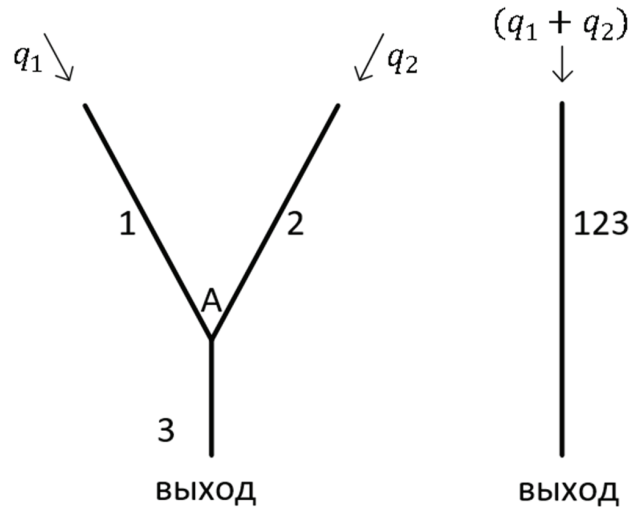
$$\gamma = \frac{\Delta Q}{Q}, \qquad (1)$$

где Q – общий объем сточной воды, поступивший на все входы сети за время T, а ΔQ – объем воды, не доставленный к очистным сооружениям вследствие аварий элементов сети за то же время.

По определению γ может изменяться в пределах от 0 до 1; при этом значению $\gamma = 0$ соответствует абсолютно надежная, а $\gamma = 1$ – абсолютно ненадежная сеть.

Таким образом, расчет γ, как это следует из (1), сводится к определению ΔQ.

Найдем ΔQ для простейшей канализационной сети, изображенной на рис. 2а.



а) б)

Рис. 2. Канализационная сеть а) и ее виртуальный эквивалент б)

Сеть имеет Y-образный вид и содержит три элемента: каналы *1, 2* и *3*. Элементы *1* и *2* соединяются между собой в точке *A*. На входы сети поступают расходы сточной воды q_1 и q_2, и по каналу *3* вода транспортируется на выход.

Рассчитаем объем воды ΔQ_Y, не доставляемый на выход такой сети из-за аварий ее элементов за время T при следующих допущениях:

- расходы сточной воды на входах сети q_1 и q_2 постоянны и известны;
- каждый из элементов сети (i-й) находится под воздействием двух потоков событий: потока отказов и потока восстановлений с интенсивностями λ_i и μ_i соответственно;
- потоки отказов и восстановлений – стационарные пуассоновские с известными параметрами λ и μ;
- при выходе элемента из строя (отказе) его пропускная способность становится равной нулю и вся сточная вода, поступающая на него, выбрасывается неочищенной на поверхность;
- вероятность одновременных отказов двух или трех элементов Y-образной сети пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью отказа одного (любого) элемента.

Определение ΔQ_Y сводится к нахождению математического ожидания дискретной случайной величины $(\Delta Q_Y)_j$, принимающей четыре значения (j = 1…4) с финальными вероятностями, вычисляемыми как результат решения соответствующей системы линейных алгебраических уравнений [10-12], и имеет вид:

$$\Delta Q_Y = \frac{(\rho_1 + \rho_3) q_1 + (\rho_2 + \rho_3) q_2}{1 + \rho_1 + \rho_2 + \rho_3} \cdot T, \qquad (2)$$

где введены безразмерные параметры $\rho_i = \lambda_i / \mu_i$, характеризующие процесс «отказ-восстановление» каждого i-го элемента сети.

Следующий шаг в разработке инженерной методики расчета γ – виртуальная трансформация сети в направлении возможного упрощения ее структуры.

С этой целью рассмотрим «вырожденную сеть», изображенную на рис. 2б, – единственный элемент *123*, находящийся под воздействием потока отказов и потока восстановлений, характеризуемых безразмерным параметром ρ_{123}, на вход которого поступает расход сточной воды $(q_1 + q_2)$. Известно [10, 12], что объем ΔQ_I воды, не доставленный на выход этого элемента из-за его отказов за время T равен:

$$\Delta Q_I = \frac{\rho_{123}}{1+\rho_{123}} \cdot (q_1 + q_2) \cdot T. \quad (3)$$

Раскладывая дробь, стоящую в правой части выражения (3), в ряд Маклорена и ограничиваясь линейным членом, имеем:

$$\Delta Q_I \approx \rho_{123} \cdot (q_1 + q_2) \cdot T. \quad (4)$$

Из (4) видно, что параметр ρ_{123} равен относительной доле объема сточной воды, не доставленной за время T на выход элемента из-за его отказов, т.е. численно совпадает с показателем эксплуатационной надежности γ, введенным выражением (1).

Если теперь ρ_{123} подобрать из условия $\Delta Q_Y = \Delta Q_I$, то элемент *123*, изображенный на рис. 2б, функционально будет вести себя (в смысле принятого критерия надежности) как Y-образная сеть, показанная на рис. 2а. И, значит, она может быть виртуально заменена единственным эквивалентным элементом *123*, имеющим параметр ρ_{123}.

Приравнивая (2) и (4) и разрешая полученное уравнение относительно ρ_{123}, получаем (с учетом очевидного неравенства $(\rho_1+\rho_2+\rho_3)<<1$):

$$\rho_{123} = \gamma = \frac{(\rho_1 + \rho_3) q_1 + (\rho_2 + \rho_3) q_2}{q_1 + q_2}. \quad (5)$$

Таким образом, виртуальная замена Y-образной сети (рис. 2а) одним эквивалентным элементом (рис. 2б) дает возможность оценивать ее надежность, рассчитывая γ по простому выражению (5).

Идея дальнейших рассуждений состоит в выявлении возможности проведения процедуры эквивалентирования не только для Y-образной сети, но и для сколь угодно сложной древовидной сети в целом [2, 3]. Предпосылки успешности такого подхода состоят в следующем.

Визуальный анализ древовидной сети (см., например, рис. 1) позволяет отметить два обстоятельства: 1) любая сложная сеть представима в виде некоей композиции простейших Y-образных сетей (структурообразующих фрагментов); 2) при виртуальном эквивалентировании любого структурообразующего фрагмента основная особенность исходной сети – ее древовидность – остается неизменной.

Расчет показателя эксплуатационной надежности γ сводится к рекуррентной пошаговой процедуре эквивалентирования Y-образных фрагментов сети, на каждом шаге которой в качестве исходных данных используются результаты расчетов на предшествующем шаге. Каждый такой шаг, начиная от входов, приводит к новой (виртуальной) сети, в отношении которой процедура повторяется. Процесс эквивалентирования заканчивается, когда исходная сеть оказывается представленной одним фиктивным элементом, показатель надежности которого определяется по выражению, аналогичному (5).

При заданной конфигурации канализационной сети процедура расчета γ хорошо алгоритмизируется и удобна для использования вычислительной техники. Примеры применения разработанной методики для расчета надежности конкретных сетей можно найти в [8, 9, 13].

Введенный показатель эксплуатационной надежности городской канализационной сети обладает рядом преимуществ, которые могут способствовать его широкому применению в инженерной практике.

Показатель γ характеризуется большой информативностью: его значение зависит, как это видно уже из (5), не только от интенсивностей отказов и восстановлений всех элементов (λ и μ), но и от технологических параметров процесса водоотведения (расходов по всем входам сети q), а также от места отказавшего элемента в структуре объекта.

Вычисление γ весьма просто и удобно при проведении надежностных расчетов для реальных канализационных сетей. Определение традиционных показателей надежности обычно связано с необходимостью решения системы алгебраических уравнений, записанных по графу состояний относительно финальных вероятностей. Если учесть, что канализационная сеть города (особенно, крупного) может содержать сотни и даже тысячи однородных элементов, то решение такой системы, в силу ее большой размерности, представляет собой чрезвычайно трудную задачу даже для современного уровня развития вычислительной техники. При определении γ таких проблем не возникает: задача сводится к последовательному рассмотрению простых подзадач, решение которых никаких трудностей не представляет.

Интересно отметить еще одно обстоятельство. При расчете ΔQ_Y принято допущение об ординарности потоков отказов и восстановлений, воздействующих на каждый Y-образный фрагмент сети. Однако когда вычисляется значение γ <u>для сети в целом</u>, требование к ординарности потоков, по-существу, снимается, поскольку при неоднократных эквивалентированиях структурообразующих фрагментов, осуществляемых, в соответствии с предложенной методикой расчета γ, независимо друг от друга, неоднократно же учитывается ординарность, т.е. при замене каждого Y-образного фрагмента, что, в принципе, не исключает возможность появления на всей сети более чем одного отказа или восстановления одновременно.

Информационная насыщенность показателя эксплуатационной надежности γ позволяет расширить возможности его использования при эксплуатации систем водоотведения городов. Некоторые задачи, при решении которых γ может быть уместным и продуктивным, в постановочном плане перечислены ниже.

Ранжирование канализационных сетей по их надежности. Рассматривая γ как комплексный показатель надежности системы водоотведения в целом, можно количественно определить **следующие основные** состояния объекта, регламентируемые ГОСТ: исправное, неисправное, работоспособное, неработоспособное и предельное [5]. Идентификационным признаком принадлежности системы к тому или иному состоянию может служить численное значение γ. Интервал изменения γ ($0 \le \gamma \le 1$) разбивается на количество подынтервалов, равное числу состояний, а факт нахождения системы в определенном из них отражается значением показателя γ, принадлежащим подынтервалу, соответствующему этому состоянию:

$0 \le \gamma < \gamma_1$ – исправное;

$\gamma_1 \le \gamma < \gamma_2$ – неисправное;

$\gamma_2 \le \gamma < \gamma_3$ – работоспособное;

$\gamma_3 \le \gamma < \gamma_4$ – неработоспособное;

$\gamma_4 \le \gamma \le 1$ – предельное.

При этом численные значения границ подынтервалов γ_1, γ_2, γ_3 и γ_4 должны устанавливаться регламентированными требованиями по охране окружающей среды.

Одним из возможных применений такого объективного ранжирования канализационных сетей может быть рациональное перераспределение регионального бюджета, выделяемого городам и населенным пунктам региона для содержания и реновации их коммунальных инфраструктур [14, 15].

Планирование мероприятий по реновации сети. Разработка планов кратко- и среднесрочных мероприятий по реновации городской канализационной сети обычно происходит путем сравнения нескольких вариантов, эмпирически предлагаемых экспертами-специалистами. Как правило, такое сравнение осуществляется по экономическим критериям и учитывает ограничения на материально-технические и финансовые возможности эксплуатирующей организации. Использование показателя эксплуатационной надежности при разработке таких планов может сводиться к виртуальной замене на модели сети элементов, предполагаемых к реновации каждым из вариантов, новыми – с соответствующими значениями λ, и расчетом γ для каждого предлагаемого варианта. Наиболее рациональным оказывается вариант, при котором значение γ оказывается наименьшим [9, 16].

Управление надежностью сети путем изменения восстановительного потенциала эксплуатирующей организации. Методологически постановка и алгоритм решения такой задачи по существу мало отличается от задачи, рассмотренной в предыдущем пункте. Различие состоит в управляющем параметре μ, физический смысл которого – среднее число ремонтов в единицу времени. Решение задачи в зависимости от конкретной постановки позволяет судить об экономически обоснованном количестве ремонтных бригад на сети, их численном составе, квалификации и оснащении, местах базирования в городе и т.п. факторах, влияющих на величину показателя эксплуатационной надежности.

Представляется, что круг проблем, которые могут решаться с привлечением показателя надежности γ, не ограничивается задачами, перечисленными выше, и при возникновении соответствующих эксплуатационных ситуаций может быть существенно расширен.

Существуют, однако, случаи, которые либо исключают, либо ограничивают возможность применения разработанной методики. Укажем на два из них.

Первый состоит в том, что встречаются города, канализационные сети которых не являются строго древовидными. Различные причины: хаотичный рост, особенности рельефа, неравномерное освоение городской территории и т.п. – исторически приводили к тому, что между отдельными бассейнами канализования сооружались гидравлические каналы-связки, нарушающие древовидность канализационной сети. Для таких сетей разработанная методика определения γ не применима, и проблема оценки надежности в рассматриваемом в данной статье смысле требует дальнейших исследований.

Второй случай обусловлен нестационарностью процессов, следствием чего является изменение интенсивностей отказов элементов сети с течением времени. При этом можно выделить две наиболее часто встречающиеся закономерности. Первая отражает естественный процесс «старения» элементов, сопровождающийся ростом числа их отказов в единицу времени. Вторая – специфическая, когда интенсивность отказов проявляет явную тенденцию к периодическому, посезонно-постоянному изменению. Обе эти тенденции, однако, не исключают возможности применения разработанной методики расчета показателя эксплуатационной надежности сети, предварительно выполнив формальную «стационаризацию» процессов. Суть стационаризации заключается в замене изменяющейся интенсивности потока отказов постоянной величиной, значение которой подбирается по некоторому предварительно принимаемому критерию. Результаты такого подхода в отношении «стареющих» элементов опубликованы в [16-18], а для посезонно-изменяющейся интенсивности – в [19-22]. Погрешности, допускаемые при такой приближенной замене [23], вполне приемлемы для инженерных расчетов.

Таким образом, в статье всесторонне рассмотрен специфический показатель эксплуатационной надежности городской канализационной сети как частного случая целого класса подобных объектов – древовидных транспортирующих структур. Подробно проанализированы достоинства введенного показателя: объективность, универсальность и информационная насыщенность. Отмечается ориентация методики расчета показателя надежности на решение практических задач, возникающих при эксплуатации городских канализационных сетей. Очерчен круг проблем, при решении которых использование введенного показателя эксплуатационной надежности может оказаться весьма продуктивным, а также сформулированы задачи для дальнейших исследований в этом направлении.

Библиографический список

1. Яковлев С.В., Воронов Ю.В. Водоотведение и очистка сточных вод: Учебник для вузов: М.: АСВ, 2002. 704 с.

2. Baranov L.A., Ermolin Y.A., Shubinsky I.B. On a Reliability of Tree-Like Transportation Networks // Reliability: Theory & Applications. No. 2(62). Vol. 16. Issue 2021. Pp. 115-123. DOI:https://doi.org/10.24412/1932-2321.1-2021-262-115-123

3. Baranov L.A., Godyaev A.I., Ermolin Y.A., Shubinsky I.B. Reliability of certain class of transportation networks // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2096(1). Issue 1. Id. 012122.

4. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. М.: Наука, 1965. 524 с.

5. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. IV, 23 с.

6. Ермолин Ю.А., Алексеев М.И. О методологии исследования надежности стареющих элементов и систем водопровода и канализации // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 9. С. 2-4.

7. Jin Y., Makherjee A. Modeling blockage failures in sewer systems to support maintenance decision making // Journal of Performance of Constructed Facilities. 2010. № 6. Pp. 622-633.

8. Ермолин Ю.А., Алексеев М.И. Надежность водоотводящих сетей и пути ее повышения // Водоснабжение и санитарная техника. 2012. № 1. С. 13-17.

9. Ермолин Ю.А., Баранов Л.А. Специфика и методологические особенности оценки надежности водоотводящих сетей крупных городов // Водоснабжение и санитарная техника. 2021. № 4. С. 50-53.

10. Ermolin Y.A. Estimation of raw sewage discharge resulting from sewer network failures // Urban Water. 2001. Vol. 3. No. 4. Pp. 271-276.

11. Ермолин Ю.А., Алексеев М.И. Reliability measure of a sewer network // Вода и экология: проблемы и решения. 2018. № 2(74). С. 51-58.

12. Baranov L.A., Ermolin Y.A., Shubinsky I.B. Reliability of a Big City Sewer Network // Reliability: Theory & Applications. No. 4(65). Vol. 16. Issue 2021. Pp. 121-136. DOI: https://doi.org/10.24412/1932-2321-2021-465-121-136

13. Алексеев М.И., Ермолин Ю.А. Использование оценки надежности стареющих канализационных сетей при их реконструкции // Водоснабжение и санитарная техника. 2004. № 6. С. 21-23.

14. Quimpo R.G., Shamsi U.M. Reliability based distribution system maintenance // Journal of Water Resources Planning and Management Division. 1991. № 117. Pp. 321-339.

15. Engelhardt M.O., Skipworth P.J., Savic D.A., et al. Rehabilitation strategies for water distribution networks: a literature review with a UK perspective // Urban Water. 2000. No. 2. Pp. 153-170.

16. Алексеев М.И., Баранов Л.А., Ермолин Ю.А. Приближенная аналитическая оценка показателей надежности стареющих объектов ВКХ // Вода и экология: проблемы и решения. 2019. № 3(79). С. 3-8.

17. Ермолин Ю.А., Алексеев М.И. Учет «старения» объекта при оценке его надежности // Водоснабжение и санитарная техника. 2016. № 5. С. 68-71.

18. Baranov L.A., Yermolin Yu.A. Dependability of objects with non-stationary failure rate // Dependability. 2017. No. 4. Pp. 3-9. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-17-4-3-9

19. Ermolin Y.A. Reliability calculation under seasonally varying failure rate // ISA Transactions. 2007. Vol. 46. Pp. 127-130.

20. Ermolin Y.A. Stationarization of the seasonally changing failure flow (with reference to reliability problems) // Applied Mathematical Modelling. 2008. Vjl. 32. Issue 10. Pp. 2034-2040.

21. Алексеев М. И., Баранов Л.А., Ермолин Ю.А. Оценка времени жизни объектов ВКХ под воздействием периодически изменяющегося потока отказов. (В порядке обсуждения) // Водоснабжение и санитарная техника. 2017. № 4. С. 50-54.

22. Baranov L.A., Ermolin Y.A. Reliability of systems with periodic piecewise constant failure rate // Russian Electrical Engineering. 2017. No. 9. Vol. 88. Pp. 605-608.

23. Баранов Л.А., Ермолин Ю.А. Оценка показателей надежности «линейно-стареющего» объекта // Надежность. 2015. № 4(55). С. 57-60.

References

1. Yakovlev S.V., Voronov Yu.V. [Waste water disposal and treatment]. Moscow: ASV; 2002. (in Russ.)

2. Baranov L.A., Ermolin Y.A., Shubinsky I.B. On a Reliability of Tree-Like Transportation Networks. *Reliability: Theory & Applications* 2021;2(62);115-123. DOI:https://doi.org/10.24412/1932-2321.1-2021-262-115-123.

3. Baranov L.A., Godyaev A.I., Ermolin Y.A., Shubinsky I.B. Reliability of certain class of transportation networks. *Journal of Physics: Conference Series* 2021;2096(1):012122.

4. Gnedenko B.V., Beliaev Yu.K., Soloviev A.D. [Mathematical methods in the dependability theory]. Moscow: Nauka; 1965. (in Russ.)

5. GOST 27.002-2015. Dependability in technics. Terms and definitions. Moscow: Standartinform; 2016. (in Russ.)

6. Yermolin Yu.A., Alekseev M.I. [On the methodology of dependability research of ageing elements and systems of water supply and waste water disposal]. *Water Supply and Sanitary Technique* 2022;9:2-4. (in Russ.)

7. Jin Y., Makherjee A. Modeling blockage failures in sewer systems to support maintenance decision making. *Journal of Performance of Constructed Facilities* 2010;6:622-633.

8. Yermolin Yu.A., Alekseev M.I. Reliable operation of wastewater collection systems and ways of its improvement.

Water Supply and Sanitary Technique 2012;1:13-17. (in Russ.)

9. Yermolin Yu.A., Baranov L.A. Specificity and methodological features of evaluating the reliability of sewer networks in large cities. *Water Supply and Sanitary Technique* 2021;4:50-53. (in Russ.)

10. Ermolin Y.A. Estimation of raw sewage discharge resulting from sewer network failures. *Urban Water* 2001;3(4):271-276.

11. Ermolin Y.A., Alexeev M.I. Reliability measure of a sewer network. *Water and Ecology* 2018;2(74):51-58. (in Russ.)

12. Baranov L.A., Ermolin Y.A., Shubinsky I.B. Reliability of a Big City Sewer Network. *Reliability: Theory & Applications* 2021;4(65):121-136. DOI: https://doi.org/10.24412/1932-2321-2021-465-121-136.

13. Alekseev M.I., Yermolin Yu.A. [Using the dependability estimates of ageing sewer systems in the course of their reconstruction]. *Water Supply and Sanitary Technique* 2004;4:21-23. (in Russ.)

14. Quimpo R.G., Shamsi U.M. Reliability based distribution system maintenance. *Journal of Water Resources Planning and Management Division* 1991;117:321-339.

15. Engelhardt M.O., Skipworth P.J., Savic D.A. et al. Rehabilitation strategies for water distribution networks: a literature review with a UK perspective. *Urban Water* 2000;2:153-170.

16. Alexeev M.I., Baranov L.A., Ermolin Y.A. Approximate analytical estimate of reliability indices for ageing facilities of water supply and sewer systems. *Water and Ecology* 2019;3(79):3-8. (in Russ.)

17. Ermolin Iu.A., Alekseev M.I. Consideration of object ageing in estimating its reliability. *Water Supply and Sanitary Technique* 2016;5:68-71. (in Russ.)

18. Baranov L.A., Yermolin Yu.A. Dependability of objects with non-stationary failure rate. *Dependability* 2017;4:3-9. DOI: 10.21683/1729-2646-2017-17-4-3-9.

19. Ermolin Y.A. Reliability calculation under seasonally varying failure rate. *ISA Transactions* 2007;46:127-130.

20. Ermolin Y.A. Stationarization of the seasonally changing failure flow (with reference to reliability problems). *Applied Mathematical Modelling* 2008;32(10):2034-2040.

21. Alekseev M.I., Baranov L.A., Ermolin Iu.A. Evaluation of water and wastewater facilities life time under the conditions of periodic failure flow. *Water Supply and Sanitary Technique* 2017;4:50-54. (in Russ.)

22. Baranov L.A., Ermolin Y.A. Reliability of systems with periodic piecewise constant failure rate. *Russian Electrical Engineering* 2017;9(88):605-608.

23. Baranov L.A., Ermolin Yu.A. Estimation of reliability indices of a “linearly ageing” object. *Dependability* 2015;(4):57-64.

Сведения об авторах

Баранов Леонид Аврамович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Управление и защита информации», Российский университет транспорта (МИИТ), Москва, Российская Федерация, e-mail: baranov.miit@gmail.com

Ермолин Юрий Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Управление и защита информации», Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация, e-mail: ermolin.y@yandex.ru

About the authors

Leonid A. Baranov, Doctor of Engineering, Professor, Head of Department of Management and Protection of Information, Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation, e-mail: baranov.miit@gmail.com.

Yuri A. Yermolin, Doctor of Engineering, Professor, Department of Management and Protection of Information, Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation, e-mail: ermolin.y@yandex.ru.

Вклад авторов в статью

Барановым Л.А. предложен специфический подход к оценке надежности древовидных транспортирующих сетей и намечены перспективные направления исследований подобных объектов. **Ермолиным Ю.А.** разработана инженерная методика расчета показателя эксплуатационной надежности систем водоотведения крупных городов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

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

Оригинальная статья / Original article
https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-10-21

Анализ структурных схем с помощью сигнатур. Вычисление сигнатуры сложной структуры

Signature-based block diagram analysis. Calculating complex-structure signatures

Валерий А. Чепурко[1*], Алексей Н. Черняев[2]
Valery A. Chepurko[1*], Alexey N. Chernyaev[2]
[1]АО РАСУ, Москва, Российская Федерация, [2]МЭИ, Москва, Российская Федерация
[1]RASU, Moscow, Russian Federation, [2]MPEI, Moscow, Russian Federation
[*]VAChepurko@rasu.ru

Валерий А. Чепурко

Алексей Н. Черняев

Аннотация. Цель. *Теория сигнатур позволяет сравнивать структурную надежность сложных систем, состоящих из одинаковых компонентов с помощью определяемого по некоторому алгоритму числового вектора, называемого сигнатурой. Сигнатура описывает структуру системы и связана с порядковой статистикой наработок до отказа компонентов. Цель данной работы состоит в ознакомлении отечественного читателя с этой теорией, а также в построении простых алгоритмов, позволяющих найти сигнатуру произвольной системы со схемой голосования «VooL», в частности, последовательно-параллельной системы, с помощью известных сигнатур ее подсистем.* **Методы.** *Для выполнения расчетов и доказательства теорем, в основном, применяются комбинаторика с различными схемами выбора элементов. Кроме этого применяются классические методы теории вероятностей и математической теории надежности.* **Выводы.** *В статье вводится такое понятие математической теории надежности, как сигнатура технической системы. Основное предназначение этой характеристики состоит в сравнении структурной надежности нескольких, в частности, двух систем. При этом алгоритм достаточно прост и связан со сравнением по определенному правилу двух конечных числовых массивов. Под структурной надежностью понимается надежность схем соединения ряда одинаковых с точки зрения надежности компонентов. Это определенным образом существенно сужает спектр возможностей теории сигнатур, т.к. практически все технические системы состоят из компонент различной надежности. Однако с определенной долей консерватизма можно считать, что все компоненты системы имеют надежность идентичную худшему с точки зрения надежности компонента. При этом степень консерватизма будет определяться различием надежности компонентов, которое будет достаточно малой величиной для высоконадежных компонентов. Кроме этого необходимо отметить чисто научную, математическую красоту теории сигнатур, которая имеет достаточно бурное развитие в зарубежных научных изданиях в последнее время. Необходимо отметить, что построение сигнатуры технической системы по классическим законам комбинаторики резко возрастает по мере увеличения n – числа элементов, составляющих систему. Поэтому возникает необходимость в разработке достаточно простых алгоритмов вычисления сигнатуры произвольной системы. В предлагаемой работе получены аналитические способы получения сигнатуры как в простых случаях, когда к подсистеме добавляется последовательно или параллельно один компонент, так и в более сложных ситуациях, когда к подсистеме добавляется несколько подсистем, в частности, одна. Рассмотрен ряд примеров построения сигнатуры, как классическим, так и предложенным в данной работе способом. Разобран пример сравнения надежности систем с помощью их сигнатур. При этом разобран пример сравнения структурной надежности систем с различным числом компонентов. В предлагаемой работе доказан ряд теорем, позволяющих вычислить сигнатуру произвольной структурной схемы, состоящей из одинаковых с точки зрения надежности компонентов.*

Abstract. Aim. *The signature theory allows comparing the structural dependability of complex systems consisting of identical components using a numeric vector referred to as signature that is determined using a certain algorithm. The signature describes a system's structure and is associated with the order statistics of the components' times to failure. The paper aims to familiarize the Russian readers with the theory, as well as to build simple algorithms that would allow finding the signature of an arbitrary VooL system, including a series parallel system using the known signatures of its subsystems.* **Methods.** *Calculations and theorem proving primarily involve the use of combinatorics with various element selection patterns. Additionally, classical methods of the probability theory and mathematical theory of dependability are used.* **Conclusions.** *The paper introduces such concept of the mathematical dependability theory as technical system signature. The primary purpose of this characteristic consists in comparing the structural dependability of several, in particular, two systems. The algorithm is sufficiently*

simple and involves comparing two finite numeric arrays according to a certain rule. Structural dependability is understood as the dependability of connection circuits of components that are identical in terms of dependability. That significantly reduces the capabilities of the signature theory, as practically all technical systems consist of components with various dependability. However, with a certain conservatism, it can be considered that all of a system's components have a dependability identical to that of the least dependable one. The degree of conservatism will be determined by the difference in the component dependability that will be a sufficiently low value for highly dependable components. Additionally, we should note the purely mathematical beauty of the signature theory that has recently been gaining significant momentum in foreign scientific publications. It must be noted that according to the classical laws of combinatorics, as the number n of system component elements grows, the construction of a technical system signature speeds up significantly. Therefore, it becomes necessary to develop sufficiently simple algorithms for calculating the signature of a random system. As part of the presented work, analytical approaches to signature acquisition were developed for both simple cases when a single component is, in series or parallely, added to a subsystem, and more complex situations when one or more subsystems are added to another subsystem. A number of cases of signature construction were considered using both the classical method, and the one suggested in this paper. An example was analysed of system dependability comparison using their respective signatures. The structural dependability of systems with various numbers of components was compared. The paper proves a number of theorems that allow calculating the signature of a random structure diagram consisting of components that are identical in terms of dependability.

Ключевые слова*: когерентная система, монотонная система, структурная функция, сигнатура, порядковая статистика, ранг, фатальная наработка, последовательное соединение, параллельное соединение, дублированная система, резервированная система, схема «m из n».*
Keywords: *coherent system, monotonic system, structural function, signature, order statistics, rank, fatal operation time, serial connection, parallel connection, duplicated system, redundant system, m-out-of-n arrangement.*

Для цитирования*: Чепурко В.А., Черняев А.Н. Анализ структурных схем с помощью сигнатур. Вычисление сигнатуры сложной структуры // Надежность. 2022. №2. С. 10-21. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-10-21*
For citation*: Chepurko V.A., Chernyaev A.N. Signature-based block diagram analysis. Calculating complex-structure signatures. Dependability 2022;2:10-21. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-10-21*

Поступила *06.04.2022 г. /* **После доработки** *12.05.2022 г. /* **К печати** *17.06.2022 г.*
Received on: *06.04.2022 /* **Revised on:** *12.05.2022 /* **For printing:** *17.06.2022.*

Введение

Теория сигнатур была введена как привлекательный инструмент для количественного определения надежности когерентных невосстанавливаемых систем (и сетей), состоящих из компонентов со случайными, независимыми и одинаково распределенными (н.о.р.) наработками до отказа [1-15]. Эти компоненты можно назвать *однотипными*. В работе [1] автор теории сигнатур исследует интенсивность отказов неустойчивой когерентной системы с элементами, имеющими независимые времена жизни с одинаковым распределением F, и, фактически, определяет понятие сигнатуры. В [2] авторы доказали, что вероятность безотказной работы системы с однотипными элементами является функцией сигнатуры системы. Авторы предложили способ сравнения надежности двух систем с одинаковым числом компонентов. Работа [3] изучает характеристики сигнатуры когерентной системы, имеющей элементы с независимыми одинаково распределенными временами жизненного цикла. Автор пришел к выводу, что сигнатура является полезным методом сравнения различных свойств систем. В монографии [4] дается достаточно полное, на тот момент времени, введение и обзор возможностей теории сигнатур, которая может применяться не только к техническим системам, но и к сетям связи. Сигнатура описывает структуру системы и связана с порядковой статистикой наработок до отказа компонентов. Близкая к теме нашего исследования работа [5] определяет понятие хвостовой сигнатуры (*tail signature*). Важным результатом является аналитический способ нахождения сигнатуры сложной системы, состоящей из двух последовательных или параллельных подсистем, а также сигнатуры системы, состоящей из N идентичных подсистем. В работе [6], также близкой к теме нашего исследования, выводятся две основные формулы для вычисления сигнатуры системы, которая может быть разложена на две подсистемы с известными сигнатурами. В качестве непосредственного приложения

получена формула для вычисления сигнатуры системной избыточности через сигнатуры исходной системы и резервной. Также авторами получена формула для вычисления сигнатуры системы покомпонентного резервирования. В [7] вводится понятие *сигнатуры выживаемости* (*survival signature*), тесно связанное с компонентами сигнатуры, и на ее основе предлагается способ сравнения систем с разнотипными компонентами. В [8] авторы рассматривают полукогерентные системы. Для таких систем приводятся формулы преобразования сигнатуры и функции надежности через соответствующий вектор доминирования. Выводятся эффективные алгоритмы для вычисления одного из этих понятий из другого. В работе показано, как можно легко вычислить сигнатуру из функции надежности с помощью основных математических действий, таких как дифференцирование, извлечение коэффициентов и интегрирование. В [9] исследуются статистические свойства оценки сигнатуры и связанных с этим понятием показателей надежности. Из этого весьма скудного обзора о современном состоянии теории сигнатур трудно сделать определенные выводы. Тем не менее, в зарубежной научной литературе такие обзоры уже делаются, хотя они являются труднодоступными, как и большинство работ по данной тематике. Интерес к теории сигнатур, по сути, начинающей свое развитие с работы [1], за последние годы ощутимо возрос, однако в отечественной литературе по теории надежности практически отсутствует. В связи с этим мы считаем необходимым продолжать знакомить читателя с этой новой и интересной темой, представив свою работу, в которой мы независимо от упомянутых работ выводим алгоритм получения сигнатуры системы «*V*oo*L*», в частности, последовательно-параллельной технической системы на основе сигнатур ее подсистем.

Определения и примеры

Введем известные определения из [10]. Пусть $\varphi(\vec{x}) = \varphi(x_1,\ldots,x_n)$ – структурная функция (надежности) некоторой системы с n элементами: e_1, e_2, …, e_n.

Определение 1. Система со структурной функцией $\varphi:\{0,1\}^n \to \{0,1\}$ называется когерентной [4] (монотонной [10]), если выполняются следующие условия:

• функция φ – неубывающая по каждому аргументу;

• каждый ее элемент является существенным, т.е. значение структурной функции изменяется при замене соответствующего элемента с абсолютно ненадежного на абсолютно надежный. Учитывая первое требование, понятно, что это изменение будет в сторону увеличения функции φ.

Из этого определения следует, что структурная функция произвольной когерентной системы должна удовлетворять условиям: $\varphi(\vec{0}) = 0$ и $\varphi(\vec{1}) = 1$. Если бы любое из этих условий нарушалось, то необходимо бы выполнялось равенство: $\varphi(\vec{0}) = \varphi(\vec{1})$, и из определения монотонности следовало бы, что каждый компонент системы несущественен.

Определим понятие сигнатуры в математической теории надежности [1-3].

Определение 2. Пусть τ – когерентная система порядка n. Пусть случайные наработки до отказа каждой из n компонент системы независимы и одинаково распределены (н.о.р.) согласно непрерывной функции распределения F. Сигнатурой системы τ с обозначением $\vec{s}^{(\tau)}$, или просто $\vec{s}$, в том случае, когда соответствующая система ясна из контекста, называется n-мерный вектор вероятностей с компонентами $s_i=P(T=X_{i:n})$, где T – наработка до отказа системы, $X_{i:n}$ – i-я порядковая статистика из n случайных наработок компонентов системы.

Пример 1. Основное (последовательное) соединение элементов. Соответствующая такой системе сигнатура будет выглядеть следующим образом: $\vec{s} = (1,0,\ldots,0)$. Первый отказавший элемент такой системы с вероятностью $s_1=P(T=X_{1:n})=1$ вызовет отказ системы. Другими словами, первая по порядку наработка является *фатальной* для системы, т.е. *приводящей к отказу.* При этом, $s_i=P(T=X_{i:n})=0$, если $i\neq 1$ Можно результат записать через символ Кронекера: $s_i = \delta_{i,1} = \begin{cases} 1, i = 1, \\ 0, i \neq 1. \end{cases}$

Пример 2. Параллельное соединение элементов. Система будет функционировать до тех пор, пока не откажет ее последний элемент. Последняя наработка будет фатальной: $P(T=X_{n:n})=1$, $s_i=\delta_{i,n}$ и $\vec{s} = (0,\ldots,0,1)$.

Пример 3. Обобщающий случай – схема «m из n». Такая схема считается работоспособной пока работают хотя бы m элементов из n. В этом случае сигнатура состоит из компонент вида:

$$s_i = \delta_{i,n-m+1}.$$

В том случае, если произойдет n–m+1-й по порядку появления отказ какого-то компонента, работающими окажется (m–1) элемент системы, и это приведет к ее отказу.

Пример 4. Рассмотрим схему, представленную на рис. 1 и рассчитаем ее сигнатуру. Для удобства расчеты сведем в табл. 1. В столбце для упрощения приведены: нумерация строк, различные виды перестановок, ограничение на количество элементов системы, фатальная наработка, ранг наработки (индекс соответствующей порядковой статистики) и вероятность перестановки.

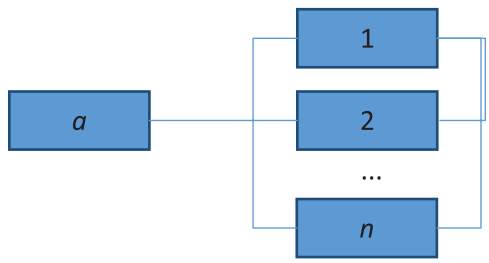


Рис. 1. Схема примера 4.

Табл. 1. Расчет сигнатуры примера 4.

№		Перестановка	Ограничение	Фатальная наработка	Ранг наработки	Вероятность
1		$X_a < X_{i_1} < \ldots < X_{i_n}$		X_a	1	1/(n+1)
2	а)	$X_{i_1} < X_a < \ldots < X_{i_n}$	n=1	X_{i_1}	1	1/(n+1)
	б)		n≥2	X_a	2	1/(n+1)
3	а)	$X_{i_1} < X_{i_2} < X_a < \ldots < X_{i_n}$	n=2	X_{i_2}	2	1/(n+1)
	б)		n≥3	X_a	3	1/(n+1)
4	а)	$X_{i_1} < X_{i_2} < X_{i_3} < X_a < \ldots$	n=3	X_{i_3}	3	1/(n+1)
	б)		n≥4	X_a	4	1/(n+1)
…	…	…	…	…	…	…

Примечание. Вероятности в последнем столбце одинаковы, т.к. случайные наработки X_a, X_1, …, X_n независимы и одинаково распределены. В этом случае вероятность нахождения наработки X_a на фиксированном месте вариационного ряда всех наработок будет равна

$$\frac{n!}{(n+1)!} = \frac{1}{n+1},$$

где (n+1)! – число всех равновозможных перестановок элементов структурной схемы, включая элемент a; n! – число всех перестановок элементов структурной схемы, без элемента a, занявшего определенную позицию.

Пусть n=1. В таблице этому ограничению соответствуют случаи 1 и 2а) . Ранг (порядок) фатальной наработки равен 1. Вероятность будет равна сумме 1/2+1/2=1 Сигнатура $\vec{s} = (1, 0)$.

Пусть n=2. В таблице этому ограничению соответствуют случаи 1, 2б), 3а). Ранг (порядок) фатальной наработки в случае 1 равен 1, в случаях 2б) и 3а) – 2. Вероятность s_1 будет равна 1/3, s_2 – сумме 1/3+1/3=2/3. Сигнатура $\vec{s} = (1/3, 2/3, 0)$. И так далее.

Произвольное n. Окончательный вид сигнатуры:

$$\vec{s} = \left(\underbrace{\frac{1}{n+1}, \ldots \frac{1}{n+1}}_{1,\ldots,n-1}, \underbrace{\frac{2}{n+1}}_{n}, \underbrace{0}_{n+1} \right).$$

Очевидное свойство сигнатуры: $\sum s_i = 1$ – сумма всех компонент сигнатуры равна 1.

Будем применять следующие обозначения:

$$\overline{s}_k = \sum_{i=1}^{k} s_i$$

– для суммы первых k компонент сигнатуры,

$$\overline{S}_k = 1 - \overline{s}_k = \sum_{i=k+1}^{n} s_i$$

– сумма последних (n–k) компонент.

Авторами данной работы независимо были доказаны четыре ниже представленные теоремы, которые публикуются без доказательства, поскольку похожие результаты, полученные в несколько ином виде, но при таких же вводных, были получены в работах [5], [6].

Последовательное соединение с однотипным компонентом

Обозначим $\vec{s}^{(n)}$ сигнатуру некоторой когерентной системы x порядка n. Соответствующие ее элементам наработки обозначим X_1, …, X_n см. рис. 2. Добавим к этой системе последовательно еще один элемент y, имеющий наработку Y н.о.р. с наработками X_1, …, X_n и определим сигнатуру $\vec{s}^{(n+1)}$ новой системы порядка n+1.

Рис. 2. Добавление последовательного элемента

Теорема 1. Пусть $\vec{s}^{(n)}$ – сигнатура некоторой когерентной системы x порядка n. При добавлении последовательно к системе x однотипного компонента k-й элемент сигнатуры будет определяться следующим выражением.

$$s_k^{(n+1)} = \frac{1 - \overline{s}_{k-1}^{(n)} + (n-k+1) s_k^{(n)}}{n+1} =$$

$$= \frac{\overline{S}_{k-1}^{(n)} + (n-k+1) s_k^{(n)}}{n+1}, k = 1, 2, \ldots, n+1.$$

При этом $\overline{S}_0^{(n)} = 1$, $\overline{S}_n^{(n)} = 0$, $\overline{s}_0^{(n)} = 0$, $\overline{s}_n^{(n)} = 1$.

Параллельное соединение с однотипным компонентом

Теперь добавим к той же когерентной системе x порядка n параллельно один элемент y, имеющий н.о.р.

наработку Y с наработками $X_1, \ldots, X_n$ и так же определим сигнатуру $\vec{s}^{(n+1)}$ новой системы порядка n+1 (рис. 3).

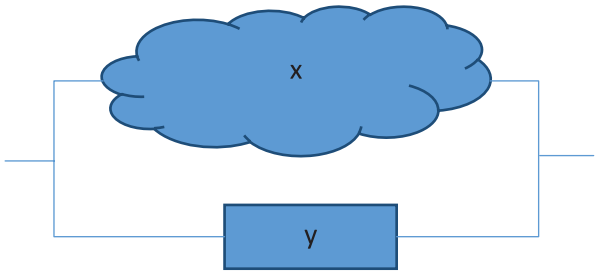


Рис. 3. Добавление резервного элемента

Теорема 2. Пусть $\vec{s}^{(n)}$ – сигнатура некоторой когерентной системы x порядка n. При добавлении параллельно к системе x однотипного компонента k-й элемент сигнатуры будет определяться следующим выражением.

$$s_k^{(n+1)} = \frac{(k-1)s_{k-1}^{(n)} + \overline{s}_{k-1}^{(n)}}{n+1}.$$

Последовательное соединение двух когерентных систем

Далее, пусть $\vec{s}^{(x)}$ будет сигнатурой некоторой когерентной системы x порядка n. Соответствующие ее элементам наработки обозначим $X_1, \ldots, X_n$ (рис. 4). Добавим к этой системе последовательно когерентную систему y с сигнатурой $\vec{s}^{(y)}$, имеющую наработки $Y_1, \ldots, Y_m$ н.о.р. с наработками $X_1, \ldots, X_n$ и определим сигнатуру $\vec{s}^{(z)}$ новой системы z порядка N=n+m.

Рис. 4. Последовательное соединение двух систем

Теорема 3. Пусть $\vec{s}^{(x)}$ будет сигнатурой некоторой когерентной системы x порядка n, $\vec{s}^{(y)}$ – сигнатура когерентной системы y и эти системы соединены последовательно. В этом случае компоненты сигнатуры объединенной системы будут определяться выражением

$$s_k^{(z)} = \frac{\sum_{i=0}^{k} A_m^i A_n^{k-i} \left(C_{k-1}^{i-1} s_i^{(y)} \left(1 - \overline{s}_{k-i}^{(x)}\right) + C_{k-1}^{i} \left(1 - \overline{s}_i^{(y)}\right) s_{k-i}^{(x)} \right)}{A_N^k},$$

где $A_m^i = \dfrac{m!}{(m-i)!}$ – число размещений из m элементов по i позициям, $C_m^i = \dfrac{m!}{i!(m-i)!}$ – число сочетаний из m по i.

Примечание. Здесь и далее для упрощения формулы предполагается, что число сочетаний $C_k^i = A_k^i = 0$ при $i \notin \{0, 1, \ldots, k\}$.

Параллельное соединение двух когерентных систем

Пусть по прежнему $\vec{s}^{(x)}$ будет сигнатурой некоторой когерентной системы x порядка n. Соответствующие ее элементам наработки обозначим $X_1, \ldots, X_n$. Резервируем эту систему когерентной системой y с сигнатурой $\vec{s}^{(y)}$, имеющую наработки $Y_1, \ldots, Y_m$ н.о.р. с наработками $X_1, \ldots, X_n$ и определим сигнатуру $\vec{s}^{(x,y)}$ новой системы порядка N=n+m (рис. 5).

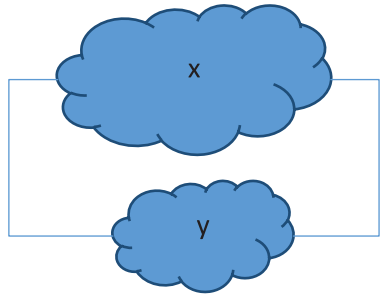


Рис. 5. Параллельное соединение двух систем

Теорема 4. Пусть $\vec{s}^{(x)}$ будет сигнатурой некоторой когерентной системы x порядка n, $\vec{s}^{(y)}$ – сигнатура когерентной системы y и эти системы соединены параллельно. В этом случае компоненты сигнатуры объединенной системы z будут равны

$$s_1^{(z)} = 0,$$

$$s_k^{(z)} = \frac{\sum_{i=1}^{k-1} A_m^i A_n^{k-i} \left(C_{k-1}^{k-i} s_i^{(y)} \overline{s}_{k-i}^{(x)} + C_{k-1}^{i} \overline{s}_i^{(y)} s_{k-i}^{(x)} \right)}{A_N^k}, k \geq 2.$$

Обобщение результата

Основная цель этой работы – получение более общего результата, т.е. нахождение сигнатуры системы «Voo$L$», в частности, последовательно-параллельной технической системы на основе сигнатур ее подсистем.

Рассмотрим L когерентных систем $x_1, \ldots, x_L$ с количеством однотипных элементов соответственно $n_1, \ldots, n_L$. Системы, вообще говоря, имеют различную структуру. Общее количество элементов будет равно

$$N = n_1 + \ldots + n_L.$$

Согласно определению 2, все N наработок до отказа – н.о.р. случайные величины. Обозначим $\vec{s}^{(x_j)}$ сигнатуру системы x_j, массив порядка n_j, j=1, …, L, в котором i-й компонент $s_i^{(x_j)}$, по сути, есть вероятность того, что i-й по порядку времени появления отказ является фатальным (приводящим к отказу) для системы x_j.

Последовательное соединение нескольких когерентных систем

Соединим последовательно L когерентных систем $x_1, \ldots, x_L$ в систему z (рис. 6). Объединенные наработки обозначим $Z_1, \ldots, Z_N$.

Структурная функция объединенной системы будет равна:

$$\varphi_z(\vec{x}) = \prod_{i=1}^{L} \varphi_{x_i}\left(x_1, \ldots, x_{n_i}\right).$$

Поскольку каждая из функций φ_{x_i} неубывающая по каждому аргументу, то и φ_z будет неубывающей по соответствующему аргументу. Во-вторых, если каждый аргумент любой из функций φ_{x_i} был существенным, то он останется таковым и для φ_z. Таким образом, объединенная система z будет когерентной.

Рис. 6. Последовательное соединение L систем

Для определения сигнатуры системы z выдвинем вспомогательные гипотезы.

$H_{i_1,\ldots,i_L \leftarrow k}$: из первых k порядковых $Z_{1:N}, \ldots, Z_{k:N}$ наработок системы x_1 ровно i_1 ..., наработок системы x_L ровно i_L: $i_1+\ldots+i_L=k$; $k=1, \ldots, N$.

Очевидно, что вероятности таких гипотез будут подчиняться обобщенному гипергеометрическому распределению.

$$P\left(H_{i_1,\ldots,i_L \leftarrow k}\right) = \frac{C_{n_1}^{i_1} \cdot \ldots \cdot C_{n_L}^{i_L}}{C_N^k}, \text{ где } C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}.$$

Для расчета условных вероятностей $P\left(T = Z_{k:N} \mid H_{i_1,\ldots,i_L \leftarrow k}\right)$ будем последовательно предполагать, что $Z_{k:N}$ это наработка x_1, или x_2, … или x_L.

Пусть x_j оказался последним, k-ым по порядку. Вероятность этого события – i_j/k. В этом случае $s_{i_j}^{(x_j)}$ будет вероятностью того, что i_j наработок из x_j окажутся фатальными для системы x_j, и, следовательно, для объединенной последовательно системы z.

$$\prod_{\substack{m=1,\\ m\neq j}}^{L}\left(1-\overline{s}_{i_m}^{(x_m)}\right) = \prod_{\substack{m=1,\\ m\neq j}}^{L}\overline{S}_{i_m}^{(x_m)}$$

это вероятность того, что остальные случившиеся ранее отказы других систем не окажутся фатальными для всей системы. Получаем условную вероятность

$$P\left(T = Z_{k:N} \equiv x_j \mid H_{i_1,\ldots,i_L \leftarrow k}\right) = \frac{i_j}{k} s_{i_j}^{(x_j)} \prod_{\substack{m=1,\\ m\neq j}}^{L}\overline{S}_{i_m}^{(x_m)}.$$

Применив формулу полной вероятности, ***доказываем теорему***.

Теорема 5. Пусть $\vec{s}^{(x_j)}$ сигнатура некоторой когерентной системы x_j порядка n_j, $j=1, \ldots, L$. При последовательном соединении L систем с однотипными компонентами k-й элемент сигнатуры когерентной системы z будет определяться следующим выражением.

$$s_k^{(z)} = \frac{1}{k \cdot C_N^k} \sum_{\substack{i_1,\ldots,i_L \\ i_1+\ldots+i_L=k}} C_{n_1}^{i_1} \cdot \ldots \cdot C_{n_L}^{i_L} \sum_{j=1}^{L} i_j s_{i_j}^{(x_j)} \prod_{\substack{m=1,\\ m\neq j}}^{L}\overline{S}_{i_m}^{(x_m)}.$$

Предположим, что системы $x_1, x_2, \ldots, x_L$ идентичны структурно и количество элементов в каждой из них n, с помощью замены индексов суммирования легко показать, что компоненты сигнатуры объединенной системы z будут определяться следующим выражением.

$$s_k^{(z)} = \frac{L}{k \cdot C_N^k} \sum_{\substack{i_1,\ldots,i_L \\ i_1+\ldots+i_L=k}} C_n^{i_1} \cdot \ldots \cdot C_n^{i_L} \cdot i_1 \cdot s_{i_1} \cdot \prod_{m=2}^{L}\overline{S}_{i_m}.$$

Приведем формулы расчета сигнатур для $L=2$ и 3.

$$L=2: s_k^{(z)} = \frac{1}{kC_N^k}\sum_i C_{n_1}^i C_{n_2}^{k-i}\left(is_i^{(x_1)}\overline{S}_{k-i}^{(x_2)} + (k-i)s_{k-i}^{(x_2)}\overline{S}_i^{(x_1)}\right).$$

Для двух идентичных структур компоненты сигнатуры объединенной системы z будут определяться следующим выражением.

$$s_k^{(z)} = \frac{\sum_{i+j=k} C_n^i C_n^j\left(is_i\overline{S}_j + j\overline{S}_i s_j\right)}{kC_N^k} = \frac{2\sum_{i=0}^{k} is_i\overline{S}_{k-i}C_n^i C_n^{k-i}}{kC_N^k}.$$

$$L=3: s_k^{(z)} = \frac{1}{kC_N^k}\sum_{i+j+l=k} C_{n_1}^i C_{n_2}^j C_{n_3}^l \times$$
$$\times\left(is_i^{(x_1)}\overline{S}_j^{(x_2)}\overline{S}_l^{(x_3)} + js_j^{(x_2)}\overline{S}_i^{(x_1)}\overline{S}_l^{(x_3)} + ls_l^{(x_3)}\overline{S}_i^{(x_1)}\overline{S}_j^{(x_2)}\right)$$

Для трех идентичных структур компоненты сигнатуры объединенной системы z будут определяться следующим выражением.

$$s_k^{(z)} = \frac{3\sum_{i+j+l=k} is_i\overline{S}_j\overline{S}_l C_n^i C_n^j C_n^l}{kC_N^k}.$$

Пример 5. Произведем расчет сигнатуры системы z_1, представленной на рис. 7.

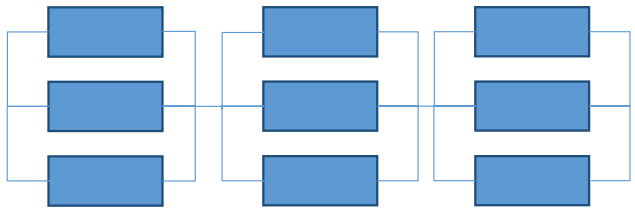


Рис. 7. Последовательное соединение 3 систем

Сигнатура каждой из трех систем будет равна $\vec{s} = (0,0,1)$, т.к. только третий отказ может быть фатальным. Суммы $\overline{S}_0 = \overline{S}_1 = \overline{S}_2 = 1$, $\overline{S}_3 = 0$. $N=9$. Легко заметить, что $s_k^{(z_1)}$ будут отличны от 0 при $7 \geq k \geq 3$. Ненулевое значение у суммы получится в том случае, если $i=3$, т.к. только s_3 отличен от 0.

Пусть $k=3$. Т.к. $i=3$, то $j+l=0$. Следовательно, $j=l=0$.

$$s_3^{(z_1)} = \frac{3\cdot 3\cdot s_3\overline{S}_0^2 C_3^3\left(C_3^0\right)^2}{3\cdot C_9^3} = \frac{1}{28}.$$

Пусть $k=4$. Т.к. $i=3$, то $j+l=1$. Это возможно в двух случаях, если $j=1$, $l=0$ или $j=0$, $l=1$.

$$s_4^{(z_1)} = \frac{3\cdot 3\cdot s_3\cdot 2\overline{S}_0\overline{S}_1 C_3^3 C_3^1 C_3^0}{4\cdot C_9^4} = \frac{3}{28}.$$

Пусть k=5. Т.к. i=3, то j+l=2. Это возможно в трех случаях, если j=2, l=0 или j=1, l=1 или j=0, l=2.

$$s_5^{(z_1)} = \frac{3\cdot 3\cdot s_3\cdot\left(2\overline{S}_0\overline{S}_2C_3^2C_3^0+\overline{S}_1^2\left(C_3^1\right)^2\right)C_3^3}{5\cdot C_9^5} = \frac{3}{14}.$$

Пусть k=6. Т.к. i=3, то j+l=3. Это получится в четырех случаях, если j=3, l=0 или j=2, l=1 или j=1, l=2 или j=0, l=3.

$$s_6^{(z_1)} = \frac{3\cdot 3\cdot s_3\cdot\left(2\overline{S}_1\overline{S}_2C_3^2C_3^1+2\overline{S}_0\overline{S}_3C_3^3C_3^0\right)C_3^3}{6\cdot C_9^6} = \frac{9}{28}.$$

Пусть k=7. Т.к. i=3, то j+l=4. Так получится в трех возможных случаях, если j=3, l=1 или j=2, l=2 или j=1, l=3. Индексы $j,l\le 0$.

$$s_7^{(z_1)} = \frac{3\cdot 3\cdot s_3\cdot\left(2\overline{S}_1\overline{S}_3C_3^3C_3^1+\overline{S}_2^2\left(C_3^2\right)^2\right)C_3^3}{7\cdot C_9^7} = \frac{9}{28}.$$

Таким образом, сигнатура системы, представленной на рис. 7 будет равна:

$$\vec{s}^{\,z_1} = \left(0,0,\frac{1}{28},\frac{3}{28},\frac{3}{14},\frac{9}{28},\frac{9}{28},0,0\right).$$

Параллельное соединение нескольких когерентных систем

Соединим параллельно L когерентных систем $x_1,\ldots,x_L$ в систему z (рис. 8) и определим сигнатуру объединенной системы.

Структурная функция объединенной системы будет равна:

$$\varphi_z\left(\vec{x}\right) = \prod_{i=1}^{L}\varphi_{x_i}\left(x_1,\ldots,x_{n_i}\right) = 1-\prod_{i=1}^{L}\left(1-\varphi_{x_i}\left(x_1,\ldots,x_{n_i}\right)\right).$$

Поскольку каждая из функций φ_{x_i} неубывающая по каждому аргументу, то $\left(1-\varphi_{x_i}\right)$ будет невозрастающей, как и произведение, следовательно, φ_z будет неубывающей по соответствующему аргументу. Далее, если каждый аргумент любой из функций φ_{x_i} был существенным, то он останется таковым и для φ_z. Таким образом, объединенная система z будет когерентной.

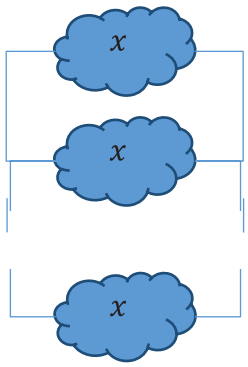


Рис. 8. Параллельное соединение L систем

Очевидно, что для объединенной системы

$$s_1^{(z)} = \ldots = s_{L-1}^{(z)} = 0.$$

Для определения остальных компонентов сигнатуры системы z выдвинем прежние вспомогательные гипотезы $H_{i_1,\ldots,i_L\leftarrow k}$.

Для расчета условных вероятностей $P\left(T=Z_{k:N}\mid H_{i_1,\ldots,i_L\leftarrow k}\right)$ как и прежде будем последовательно предполагать, что $Z_{k:N}$ это наработка x_1, или x_2, … или x_L.

Пусть x_j оказался последним, k-ым по порядку. Вероятность этого события – i_j/k. В этом случае $s_{i_j}^{(x_j)}$ будет вероятностью того, что i_j наработок из x_j окажутся фатальными для системы x_j, и, следовательно, для объединенной параллельно системы z

$$\prod_{\substack{m=1,\\ m\ne j}}^{L}\overline{s}_{i_m}^{(x_m)}$$

– это вероятность того, что остальные случившиеся ранее отказы других систем окажутся фатальными для каждой из них системы. Здесь $\overline{s}_{i_m}^{(x_m)}$ – это вероятность того, что не более i_m отказов оказались фатальными для системы x_m.

Получаем условную вероятность

$$P\left(T=Z_{k:N}\equiv x_j\mid H_{i_1,\ldots,i_L\leftarrow k}\right) = \frac{i_j}{k}s_{i_j}^{(x_j)}\prod_{\substack{m=1,\\ m\ne j}}^{L}\overline{s}_{i_m}^{(x_m)}.$$

Применив формулу полной вероятности, ***доказываем теорему***.

Теорема 6. Пусть $\vec{s}^{\,(x_j)}$ сигнатура некоторой когерентной системы x_j порядка n_j, j=1,…,L. При параллельном соединении L систем с однотипными компонентами k-й элемент сигнатуры когерентной системы z будет определяться следующим выражением.

$$s_k^{(z)} = \frac{1}{k\cdot C_N^k}\sum_{\substack{i_1,\ldots,i_L\\ i_1+\ldots+i_L=k}} C_{n_1}^{i_1}\cdot\ldots\cdot C_{n_L}^{i_L}\sum_{j=1}^{L}i_js_{i_j}^{(x_j)}\prod_{\substack{m=1,\\ m\ne j}}^{L}\overline{s}_{i_m}^{(x_m)}, k\ge L.$$

При этом $s_1^{(z)} = \ldots = s_{L-1}^{(z)} = 0$.

Предположим, что системы x_1, x_1, …, x_L идентичны структурно и количество элементов в каждой из них n, с помощью замены индексов суммирования легко показать, что компоненты сигнатуры объединенной системы z будут определяться следующим выражением.

$$s_k^{(z)} = \frac{L}{k\cdot C_N^k}\sum_{\substack{i_1,\ldots,i_L\\ i_1+\ldots+i_L=k}} C_n^{i_1}\cdot\ldots\cdot C_n^{i_L}\cdot i_1\cdot s_{i_1}\cdot\prod_{m=2}^{L}\overline{s}_{i_m}.$$

Приведем формулы расчета сигнатур для L=2 и 3.

$$L=2: s_k^{(z)} = \frac{1}{kC_N^k}\sum_i C_{n_1}^iC_{n_2}^{k-i}\left(is_i^{(x_1)}\overline{s}_{k-i}^{(x_2)}+\left(k-i\right)s_{k-i}^{(x_2)}\overline{s}_i^{(x_1)}\right).$$

Для двух идентичных структур компоненты сигнатуры объединенной системы z будут определяться следующим выражением.

$$s_k^{(z)} = \frac{\sum_{i+j=k}C_n^iC_n^j\left(is_i\overline{s}_j+j\overline{s}_is_j\right)}{kC_N^k} = \frac{2\sum_{i=0}^{k}is_i\overline{s}_{k-i}C_n^iC_n^{k-i}}{kC_N^k}.$$

$$L=3: s_k^{(z)}=\frac{1}{kC_N^k}\sum_{i+j+l=k} C_{n_1}^i C_{n_2}^j C_{n_3}^l \times$$
$$\times\left(is_i^{(x_1)}\overline{s}_j^{(x_2)}\overline{s}_l^{(x_3)}+js_j^{(x_2)}\overline{s}_i^{(x_1)}\overline{s}_l^{(x_3)}+ls_l^{(x_3)}\overline{s}_i^{(x_1)}\overline{s}_j^{(x_2)}\right)$$

Для трех идентичных структур компоненты сигнатуры объединенной системы z будут определяться следующим выражением.

$$s_k^{(z)}=\frac{3\sum_{i+j+l=k} is_i\overline{s}_j\overline{s}_l C_n^i C_n^j C_n^l}{kC_N^k}.$$

Пример 6. Произведем расчет сигнатуры системы z_2, представленной на рис. 9.

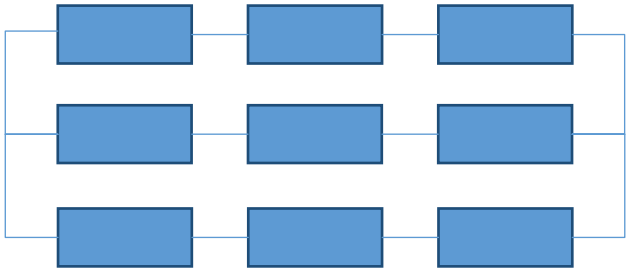


Рис. 9. Параллельное соединение 3 систем

Сигнатура каждой из трех систем будет равна $\vec{s}=(1,0,0)$, т.к. первый отказ является фатальным. Суммы $\overline{s}_1=\overline{s}_2=\overline{s}_3=1$, $\overline{s}_0=0$. N=9. Легко заметить, что $s_k^{(z_2)}$ будут отличны от 0 при $7\geq k\geq 3$. Ненулевое значение у суммы в числителе дроби за счет s_1=1 получится в том случае, если i=1.

Пусть k=3. Т.к. i=1, то $j+l$=2. При этом j и l должны быть отличны от нуля, т.к. $\overline{s}_0=0$. Следовательно, $j=l$=1.

$$s_3^{(z_2)}=\frac{3\cdot 1\cdot s_1\overline{s}_1^2\left(C_3^1\right)^3}{3\cdot C_9^3}=\frac{9}{28}.$$

Пусть k=4. Т.к. i=1, то $j+l$=3. Ненулевое значение у суммы получится в том случае, если j=1, l=2 или j=2, l=1.

$$s_4^{(z_2)}=\frac{3\cdot 1\cdot s_1\cdot 2\overline{s}_1\overline{s}_2 C_3^2\left(C_3^1\right)^2}{4\cdot C_9^4}=\frac{9}{28}.$$

Пусть k=5. Т.к. i=1, то $j+l$=4. Ненулевое значение у суммы получится в трех случаях, если j=3, l=1 или j=2, l=2 или j=1, l=3.

$$s_5^{(z_2)}=\frac{3\cdot 1\cdot s_1\cdot\left(2\overline{s}_1\overline{s}_3 C_3^1 C_3^3+\overline{s}_2^2\left(C_3^2\right)^2\right)C_3^1}{5\cdot C_9^5}=\frac{3}{14}.$$

Пусть k=6. Т.к. i=1, то $j+l$=5. Ненулевое значение у суммы получится в двух возможных случаях ($j,l\leq 3$), если j=3, l=2 или j=2, l=3.

$$s_6^{(z_2)}=\frac{3\cdot 1\cdot s_1\cdot 2\overline{s}_2\overline{s}_3 C_3^2 C_3^3 C_3^1}{6\cdot C_9^6}=\frac{3}{28}.$$

Пусть k=7. Т.к. i=1, то $j+l$=6. Ненулевое значение у суммы получится в одном возможном случае, если $j=l$=3.

$$s_7^{(z_2)}=\frac{3\cdot 1\cdot s_1\cdot\overline{s}_3\overline{s}_3\left(C_3^3\right)^2 C_3^1}{7\cdot C_9^7}=\frac{1}{28}.$$

Таким образом, сигнатура системы, представленной на рисунке 9, будет равна:

$$\vec{s}^{\,z_2}=\left(0,0,\frac{9}{28},\frac{9}{28},\frac{3}{14},\frac{3}{28},\frac{1}{28},0,0\right).$$

Соединение нескольких когерентных систем с логикой голосования *VooL*

Соединим параллельно согласно логике *VooL* L когерентных систем $x_1, \ldots, x_L$ в систему z (рис. 10) и определим сигнатуру объединенной системы. Для успешного функционирования такой системы необходимо, чтобы работало не менее V систем.

Структурная функция объединенной системы в общем случае будет громоздкой, но и в этом случае можно показать, что объединенная система z будет когерентной [10].

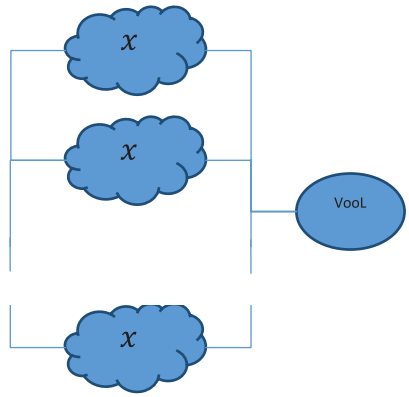


Рис. 10. Схема голосования VooL

Очевидно, что для объединенной системы

$$s_1^{(z)}=\ldots=s_{L-V}^{(z)}=0.$$

Для определения остальных компонентов сигнатуры системы z выдвинем прежние вспомогательные гипотезы $H_{i_1,\ldots,i_L\leftarrow k}$. Вероятность их будет прежней.

Для расчета условных вероятностей $P\left(T=Z_{k:N}\mid H_{i_1,\ldots,i_L\leftarrow k}\right)$ как и прежде будем последовательно предполагать, что $Z_{k:N}$ это наработка x_1, или x_2, … или x_L.

Пусть x_j оказался последним, k-ым по порядку. Вероятность этого события – i_j/k. В этом случае $s_{i_j}^{(x_j)}$ будет вероятностью того, что i_j наработок из x_j окажутся фатальными для системы x_j, и, следовательно, для объединенной параллельно с логикой *VooL* системы z.

Нам необходимо выбрать из множества $x_1, \ldots, x_{j-1}, x_{j+1}, \ldots, x_L$ ($L-V$) систем, которые откажут, вероятность отказа каждой из них будет $\overline{s}_{i_m}^{(x_m)}$ с соответствующим системе индексом. При этом останется (V–1) систем, которые не откажут, вероятность работы каждой из них будет $\overline{s}_{i_m}^{(x_m)}$ с соответствующим системе индексом. Количество способов выбора таких систем будет определяться числом $M=C_{(L-1)}^{(V-1)}$. Обозначим F_i, i=1, …, M подмножество из ($L-V$) систем, каждое из которых отказало ранее.

Таким образом, условная вероятность будет определяться суммированием всевозможных вариантов выбора:

$$P\left(T = Z_{k:N} \equiv x_j \mid H_{i_1,\ldots,i_L \leftarrow k}\right) = \frac{i_j}{k} s_{i_j}^{(x_j)} \sum_{l=1}^{M} \prod_{m=1}^{L} \left(\overline{s}_{i_m}^{(x_m)}\right)^{\delta_{m,l}} \left(\overline{S}_{i_m}^{(x_m)}\right)^{1-\delta_{m,l}},$$

где $\delta_{m,l} = I\left\{x_m \in F_l\right\} = \begin{cases} 1, \text{ если } x_m \in F_l \\ 0, \text{ если } x_m \notin F_l \end{cases}$.

Применив формулу полной вероятности, ***доказываем теорему***.

Теорема 7. Пусть $\vec{s}^{(x_j)}$ сигнатура некоторой когерентной системы x_j порядка n_j, j=1, …, L. При параллельном соединении по схеме Voo$L$ L систем с однотипными компонентами k-й элемент сигнатуры когерентной системы z будет определяться следующим выражением.

$$s_k^{(z)} = \frac{1}{k \cdot C_N^k} \sum_{\substack{i_1,\ldots,i_L \\ i_1+\ldots+i_L=k}} C_{n_1}^{i_1} \cdot \ldots \cdot C_{n_L}^{i_L} \times \sum_{j=1}^{L} i_j s_{i_j}^{(x_j)} \times$$

$$\times \sum_{l=1}^{M} \prod_{m=1}^{L} \left(\overline{s}_{i_m}^{(x_m)}\right)^{\delta_{m,l}} \left(\overline{S}_{i_m}^{(x_m)}\right)^{1-\delta_{m,l}}, \; k \geq L - V + 1.$$

где $\delta_{m,l} = I\left\{x_m \in F_l\right\} = \begin{cases} 1, \text{ если } x_m \in F_l \\ 0, \text{ если } x_m \notin F_l \end{cases}$, $M = C_{(L-1)}^{(V-1)}$.

При этом $s_1^{(z)} = \ldots = s_{L-V}^{(z)} = 0$.

Из этого результата следуют первые две теоремы, если положить L=V для последовательного соединения и L=1 для параллельного. Однако мы решили оставить их доказательства независимыми для упрощения понимания.

Предположим, что системы x_1, x_2, …, x_L идентичны структурно и количество элементов в каждой из них n, с помощью замены индексов суммирования легко показать, что компоненты сигнатуры объединенной системы z будут определяться следующим выражением.

$$s_k^{(z)} = \frac{L \cdot M}{k \cdot C_N^k} \sum_{\substack{i_1,\ldots,i_L \\ i_1+\ldots+i_L=k}} C_n^{i_1} \cdot \ldots \cdot C_n^{i_L} \cdot i_1 \cdot s_{i_1} \cdot \prod_{m=2}^{L-V+1} \overline{s}_{i_m} \cdot \prod_{m=L-V+2}^{L} \overline{S}_{i_m}.$$

Приведем формулы расчета сигнатур для L=3 и V=2.

$$s_k^{(z)} = \frac{1}{kC_N^k} \sum_{i+j+l=k} C_{n_1}^i C_{n_2}^j C_{n_3}^l \times$$

$$\times \begin{pmatrix} is_i^{(x_1)} \left(\overline{s}_j^{(x_2)} \overline{S}_l^{(x_3)} + \overline{S}_j^{(x_2)} \overline{s}_l^{(x_3)}\right) + js_j^{(x_2)} \left(\overline{s}_i^{(x_1)} \overline{S}_l^{(x_3)} + \overline{S}_i^{(x_1)} \overline{s}_l^{(x_3)}\right) + \\ +ls_l^{(x_3)} \left(\overline{s}_i^{(x_1)} \overline{S}_j^{(x_2)} + \overline{S}_i^{(x_1)} \overline{s}_j^{(x_2)}\right) \end{pmatrix}.$$

Для трех идентичных структур компоненты сигнатуры объединенной системы z будут определяться следующим выражением.

$$s_k^{(z)} = \frac{6 \sum_{i+j+l=k} i s_i \overline{s}_j \overline{S}_l C_n^i C_n^j C_n^l}{kC_N^k}.$$

Пример 7. Произведем расчет сигнатуры системы z_3, представленной на рис. 11.

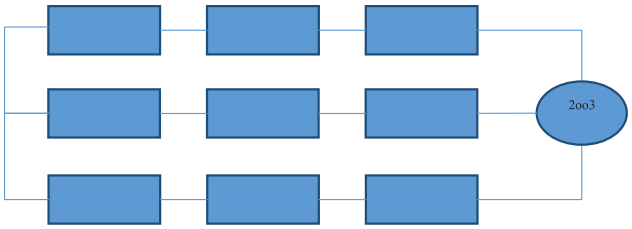


Рис. 11. Параллельное соединение 3 систем

Сигнатура каждой из трех систем будет равна $\vec{s} = (1,0,0)$, т.к. первый отказ является фатальным. Суммы $\overline{s}_1 = \overline{s}_2 = \overline{s}_3 = 1, \overline{s}_0 = 0$. Суммы $\overline{S}_1 = \overline{S}_2 = \overline{S}_3 = 0, \overline{S}_0 = 1$. N=9. Легко заметить, что $s_k^{(z_3)}$ будут отличны от 0 при 4≥k≥2. Ненулевое значение у суммы в числителе дроби за счет s_1=1 получится в том случае, если i=1.

Пусть k=2. Т.к. i=1, то j+l=1 При этом j должно быть отличны от нуля, т.к. $\overline{s}_0 = 0$. Следовательно, j=1, l=0.

$$s_2^{(z_3)} = \frac{6 \cdot 1 \cdot s_1 \cdot \overline{s}_1 \overline{S}_0 \left(C_3^1\right)^2 C_3^0}{2 \cdot C_9^2} = \frac{3}{4}.$$

Пусть k=3. Т.к. i=1, то j+l=2 Ненулевое значение у суммы получится в том случае, если j=2, l=0.

$$s_3^{(z_3)} = \frac{6 \cdot 1 \cdot s_1 \cdot \overline{s}_2 \overline{S}_0 C_3^1 C_3^2 C_3^0}{3 \cdot C_9^3} = \frac{3}{14}.$$

Пусть k=4. Т.к. i=1, то j+i=3 Ненулевое значение у суммы получится в том случае, если j=3, l=0.

$$s_4^{(z_3)} = \frac{6 \cdot 1 \cdot s_1 \cdot \overline{s}_3 \overline{S}_0 C_3^1 C_3^3 C_3^0}{4 \cdot C_9^4} = \frac{1}{28}.$$

Таким образом, сигнатура системы, представленной на рис. 11, будет равна:

$$\vec{s}^{\,z_3} = \left(0, \frac{3}{4}, \frac{3}{14}, \frac{1}{28}, 0, 0, 0, 0, 0\right).$$

Сравнение надежности систем с помощью сигнатур

В последней части нашей статьи рассмотрим вопрос сравнения надежности различных систем с помощью сигнатур. В работах [2]-[4] доказан следующий результат.

Пусть есть две системы x и y, каждая с одинаковым количеством компонент- n, наработки до отказа 2n компонент независимы и одинаково распределены с функцией распределения $F(t)$. Пусть $\vec{s}^{(x)}$, $\vec{s}^{(y)}$ – сигнатуры систем x и y соответственно, а их наработки до отказа $T^{(x)}$, $T^{(y)}$. Если

$$\sum_{i=j}^{n} s_i^{(x)} \geq \sum_{i=j}^{n} s_i^{(y)}$$

для всех j=1, …, n, то $P\left(T^{(x)} > t\right) \geq P\left(T^{(y)} > t\right)$ для всех t>0.

При этом, если хотя бы одно из неравенств, при каком-то j, строгое, то $T^{(x)}$ будет стохастически больше $T^{(y)}$, или система x будет надежнее y.

Если в системе неравенств присутствуют строгие неравенства обоих типов, как «<», так и «>», то такие системы несравнимы с точки зрения надежности. В этом случае при определенной надежности элементов будет «выигрывать» одна система, при другой – другая.

Вероятность $P\left(T^{(x)} > t\right)$ по сути есть функция надежности или вероятность безотказной работы. Этот результат следует напрямую из теоремы 3.1 и формулы (3.2) из [4]:

$$P(T > t) = \sum_{j=0}^{n-1}\left(\sum_{i=j+1}^{n} s_i\right) C_n^j \left(F(t)\right)^j \left(\overline{F}(t)\right)^j,$$

где $\overline{F}(t) = 1 - F(t) = P(T > t)$ – функция надежности компонента.

В наших обозначениях для сравнения надежности систем мы должны сравнить соответствующие суммы сигнатур $\overline{S}_{j-1} = \sum_{i=j}^{n} s_i$ для всех j=1, …, n.

Для системы из примера 5 суммарные сигнатуры приведены ниже. Заметим, что индексация массива начинается с 0, первый элемент массива $\overline{S}_0$, второй – $\overline{S}_1$ и т.д. до $\overline{S}_{n-1}$:

$$\overline{\overline{S}}^{z_1} = \left(1,1,1,\frac{27}{28},\frac{24}{28},\frac{18}{28},\frac{9}{28},0,0\right).$$

Система из примера 6:

$$\overline{\overline{S}}^{z_2} = \left(1,1,1,\frac{19}{28},\frac{10}{28},\frac{4}{28},\frac{1}{28},0,0\right).$$

Система из примера 7:

$$\overline{\overline{S}}^{z_3} = \left(1,1,\frac{7}{28},\frac{1}{28},0,0,0,0,0\right).$$

Сравним надежности первой и второй системы:

$$\overline{S}_i^{z_1} = \overline{S}_i^{z_2},\ i = 1,2,3,8,9;\ \overline{S}_i^{z_1} > \overline{S}_i^{z_2},\ i = 4,5,6,7.$$

Следовательно, первая система надежнее второй.

Сравним надежности второй и третьей системы:

$$\overline{S}_i^{z_2} = \overline{S}_i^{z_3},\ i = 1,2,8,9;\ \overline{S}_i^{z_2} > \overline{S}_i^{z_3},\ i = 3,\ldots,7.$$

Таким образом, можно сделать вывод о том, что самая надежная система из первого примера, затем система из второго примера и самая ненадежная система из третьего примера.

Сравнивать надежности систем с помощью сигнатур можно и в том случае, если они состоят из разного количества компонент, но с одинаково надежными компонентами. Для этого есть несложный рекуррентный алгоритм выравнивания количества компонент, точнее говоря, повышения меньшего числа компонент до большего [4]. При этом функция надежности остается прежней.

Алгоритм выравнивания основан на следующем результате [4]. Пусть $\vec{s} = (s_1,\ldots,s_m)$ – сигнатура некоторой системы x с m элементами, имеющей случайную наработку T_x. Определим новую систему x^*, имеющей случайную наработку T_x^*, с сигнатурой $\vec{s}^* = \left(s_1^*,\ldots,s_m^*,s_{m+1}^*\right)$, элементы которой определяются следующим образом:

$$s_j^* = \frac{j-1}{m+1} s_{j-1} + \frac{m+1-j}{m+1} s_j \quad j = 1,\ldots,m+1, s_0 = s_{m+1} = 0.$$

В этом случае, функции надежности систем x и x^* будут равны: $P(T_x > t) = P\left(T_x^* > t\right)$ для всех t>0.

Для демонстрации этого результата рассмотрим следующий пример.

Пример 8. Резервируем самую ненадежную систему, представленную на рисунке 11, одним элементом, имеющим такую же по распределению наработку, как и остальные 9 элементов. Т.е. добавим параллельно 1 элемент к этой системе. Определим сигнатуру такой системы, которую обозначим z_3(+1). Для этого проще всего воспользоваться результатом теоремы 2. При добавлении параллельно к системе x однотипного компонента k-й элемент сигнатуры будет определяться следующим выражением.

$$s_k^{(n+1)} = \frac{(k-1)s_{k-1}^{(n)} + \overline{s}_{k-1}^{(n)}}{n+1}, k = 1,\ldots,n+1.$$

Система из примера 7 имеет следующую сигнатуру: $\vec{s}^{z_3} = \left(0,\frac{3}{4},\frac{3}{14},\frac{1}{28},0,0,0,0,0\right)$.

Вектор суммы первых компонент: $\left(0,\frac{3}{4},\frac{27}{28},1,1,1,1,1,1\right)$.

Сигнатура резервированной дополнительным элементом системы:

$$\vec{s}^{z_3(+1)} = \left(0,0,\frac{9}{40},\frac{9}{56},\frac{8}{70},\frac{1}{10},\frac{1}{10},\frac{1}{10},\frac{1}{10},\frac{1}{10}\right).$$

Суммарная сигнатура резервированной дополнительным элементом системы:

$$\overline{\overline{S}}^{z_3(+1)} = \left(1,1,1,\frac{217}{280},\frac{172}{280},\frac{140}{280},\frac{112}{280},\frac{84}{280},\frac{56}{280},\frac{28}{280}\right).$$

Теперь сравним надежность резервированной дополнительным элементом системы с надежностью первых двух систем z_1 и z_2, представленных на рис. 7 и 9, которые имеют на один элемент меньше. Для этого необходимо «выровнять» количества элементов, т.е. дополнить системы z_1 и z_2 одним элементом по указанному выше алгоритму. После несложных вычислений получим сигнатуры «выровненных» систем z_1^* и z_2^*:

$$\vec{s}^{z_1^*} = \left(0,0,\frac{1}{40},\frac{3}{40},\frac{3}{20},\frac{33}{140},\frac{81}{280},\frac{9}{40},0,0\right),$$

$$\vec{s}^{z_2^*} = \left(0,0,\frac{9}{40},\frac{81}{280},\frac{33}{140},\frac{3}{20},\frac{3}{40},\frac{1}{40},0,0\right).$$

Суммарные сигнатуры систем z_1^* и z_2^*:

$$\overline{\overline{S}}^{z_1^*} = \left(1,1,1,\frac{273}{280},\frac{252}{280},\frac{210}{280},\frac{144}{280},\frac{63}{280},0,0\right),$$

$$\overline{\overline{S}}^{z_2^*} = \left(1,1,1,\frac{217}{280},\frac{136}{280},\frac{70}{280},\frac{28}{280},\frac{7}{280},0,0\right).$$

Сравнивая суммарные сигнатуры систем z_1^* и $z_3(+1)$ легко заметить, что

$$\overline{S}_i^{z_1^*} = \overline{S}_i^{z_3(+1)},\ i = 1,2,3;\ \overline{S}_i^{z_1^*} > \overline{S}_i^{z_3(+1)},\ i = 4,\ldots,7;$$
$$\overline{S}_i^{z_1^*} < \overline{S}_i^{z_3(+1)},\ i = 8,\ldots,10.$$

Таким образом, системы z_1^* (а значит, и z_1) и $z_3(+1)$ несравнимы с точки зрения надежности. Т.е. при определенной надежности элемента схемы выигрывает одна схема, при другой – другая. Теперь сравним систем z_2^* и $z_3(+1)$:

$$\overline{S}_i^{z_2^*} = \overline{S}_i^{z_3(+1)},\ i = 1,\ldots,4;\ \overline{S}_i^{z_2^*} < \overline{S}_i^{z_3(+1)},\ i = 5,\ldots,10.$$

Можно сделать вывод о том, что резервированная дополнительным элементом система $z_3(+1)$ стала надежнее системы z_2.

Теория сигнатур активно развивается, и, при этом, многие вопросы остаются пока неразрешенными. Один из них состоит в том, как определить сигнатуру системы, компоненты которой имеют различную надежность. В [7] предложен один из подходов. При том вопрос сравнения таких систем с помощью сигнатур пока не решен.

Заключение

В статье приводятся основные сведения о достаточно новом для отечественной науки понятии в структурной надежности – сигнатура технической системы. Необходимо отметить несколько ограничений применения теории сигнатур. Во-первых, сравниваемые системы должны состоять из одинаковых с точки зрения надежности невосстанавливаемых элементов, наработки до отказа которых независимы. Во-вторых, сами системы должны быть монотонными (когерентными) структурами. Сложность построения сигнатуры технической системы по законам комбинаторики резко возрастает по мере увеличения n – числа элементов, составляющих систему. Поэтому необходимы инструменты, позволяющие находить сигнатуру не прибегая к законам комбинаторики.

В статье даются основные определения, рассматривается ряд примеров нахождения сигнатур. Впервые предложен способ построения сигнатур последовательно-параллельной систем и систем по схеме голосования «*V*oo*L*» на основе сигнатур ее подсистем. Разобран пример сравнения надежности систем с помощью их сигнатур. В дальнейших планах исследования сигнатур авторы предлагают рассмотреть способы построения сигнатур средствами языка программирования R, обобщения сигнатур на системы с компонентами, имеющими различную надежность и другие вопросы.

Библиографический список

1. Samaniego F.J. On closure of the IFR class under formation of coherent systems // IEEE Trans. Reliability. 1985. Vol. 34. Pp. 69–72.
2. Kochar S., Mukerjee H., Samaniego F.J. The “Signature” of a Coherent System and Its Application to Comparisons among Systems. Naval Research Logistics, 1999. DOI: 10.1002/(SICI)1520-6750(199908)46:5<507::AID-NAV4>3.0.CO;2-D
3. Boland P.J. Signatures of indirect majority systems // J. Appl. Prob. 2001. Vol. 38. Pp. 597–603. DOI: https://doi.org/10.1239/jap/996986765
4. Samaniego F.J. System signatures and their applications in engineering reliability. Springer, New York, 2007. DOI: 10.1007/978-0-387-71797-5
5. Gertsbakh I., Shpungin Y., Spizzichino F. Signatures of coherent systems built with separate modules // J. Appl. Probab. 2011. Vol. 48(3). Pp. 843–855. DOI: https://doi.org/10.1239/jap/1316796919
6. Da G., Ben Zheng, Taizhong Hu. On computing signatures of k-out-of-n systems consisting of modules // Methodology and Computing in Applied Probability. 2014. Vol. 16(1). Pp. 223–233. DOI:10.1016/j.jmva.2011.06.015
7. Coolen F.P.A., Coolen-Maturi T. Generalizing the Signature to Systems with Multiple Types of Components. In: Zamojski W., Mazurkiewicz J., Sugier J., Walkowiak T., Kacprzyk J. (eds) Complex Systems and Dependability. Advances in Intelligent and Soft Computing, vol 170. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. DOI: 10.1007/978-0-387-71797-5
8. Marichal J. Algorithms and Formulae for Conversion Between System Signatures and Reliability Functions // Journal of Applied Probability. 2015. Vol. 52(2). Pp. 490-507. DOI:10.1239/jap/1437658611
9. Jin Y., Hall P.G., Jiming Jiang et al. Estimating component reliability based on failure time data from a system of unknown design // Statistica Sinica. 2017. Vol. 27. doi:http://dx.doi.org/10.5705/ss.202015.0209
10. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход: Пер. с нем. М.: Радио и связь, 1988. 392 с.

References

11. Samaniego F.J. On closure of the IFR class under formation of coherent systems. *IEEE Trans. Reliability*1985;34:69-72.
12. Kochar S., Mukerjee H., Samaniego F.J. The “Signature” of a Coherent System and Its Application to Comparisons among Systems. *Naval Research Logistics* 1999. DOI: 10.1002/(SICI)1520-6750(199908)46:5<507::AID-NAV4>3.0.CO;2-D.
13. Boland P.J. Signatures of indirect majority systems. *J. Appl. Prob.* 603;2001:597-38. DOI: https://doi.org/10.1239/jap/996986765.
14. Samaniego F.J. System signatures and their applications in engineering reliability. New York: Springer; 2007. DOI: 10.1007/978-0-387-71797-5.

15. Gertsbakh I., Shpungin Y., Spizzichino F. Signatures of coherent systems built with separate modules. *J. Appl. Probab.* 2011;48(3):843–855. DOI: https://doi.org/10.1239/jap/1316796919.

16. Da G., Zheng B., Hu T. On computing signatures of k-out-of-n systems consisting of modules. *Methodology and Computing in Applied Probability* 2014;16(1):223-233. DOI:10.1016/j.jmva.2011.06.015.

17. Coolen F.P.A., Coolen-Maturi T. Generalizing the Signature to Systems with Multiple Types of Components. In: Zamojski W., Mazurkiewicz J., Sugier J., Walkowiak T., Kacprzyk J., editors. *Complex Systems and Dependability. Advances in Intelligent and Soft Computing* 2013;170. Berlin, Heidelberg: Springer. DOI: 10.1007/978-0-387-71797-5.

18. Marichal J. Algorithms and Formulae for Conversion Between System Signatures and Reliability Functions. *Journal of Applied Probability* 2015;52(2):490-507. DOI:10.1239/jap/1437658611.

19. Jin Y., Hall P.G., Jiang J. et al. Estimating component reliability based on failure time data from a system of unknown design. *Statistica Sinica* 2017;27. doi:http://dx.doi.org/10.5705/ss.202015.0209.

20. Beichelt F., Franken P. Reliability and Maintenance – Mathematical Methods. Moscow: Radio i sviaz; 1988.

Сведения об авторах

Чепурко Валерий Анатольевич – кандидат физико-математических наук, доцент, главный специалист отдела расчетных обоснований проектных решений АО РАСУ, Москва, Российская Федерация, e-mail: VAChepurko@rasu.ru, тел. +7(903)815-97-37

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

About the authors

Valery A. Chepurko, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Chief Specialist, Division for Computational Substantiation of Design Solutions, RASU, Moscow, Russian Federation, e-mail: VAChepurko@rasu.ru, phone: +7 (903) 815 97 37.

Alexey N. Chernyaev, Candidate of Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Automated Thermal Management Systems, MPEI, Moscow, Russian Federation, e-mail: ChernyaevAN@mpei.ru, phone: +7 (495) 362 77 20, +7 (495) 362 70 29.

Вклад авторов в статью

Чепурко В.А. провел обзор литературы, доказал теоремы 2, 4, 6, 7, разобрал примеры 5-7.

Черняев А.Н. доказал теоремы 1, 3, 5, разобрал примеры 1-4, 8.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Оригинальная статья / Original article
https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-22-29

Формирование диаграмм состояний-переходов в условиях мониторинга технического состояния

Defining state-transition diagrams as part of technical state monitoring

Борис П. Зеленцов, *Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск, Российская Федерация*
Boris P. Zelentsov, *Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Novosibirsk, Russian Federation*
zelentsovb@mail.ru

Борис П. Зеленцов

Резюме. *Приведены диаграммы состояний-переходов в условиях мониторинга, при котором учитываются явные и скрытые отказы.* **Цель.** *Формирование диаграмм состояний-переходов, которые используются для разработки модели надежности и соответственно расчетных методов, в условиях мониторинга с периодическим контролем.* **Методы.** *В основу метода положена классификация отказов по признаку их обнаружения: явные и скрытые отказы. В соответствии с этим контроль состояния объектов может быть непрерывным и/или периодическим. При этом периодический контроль проводится с постоянным периодом. При формировании диаграммы состояний-переходов учтены причинно-следственные связи между состояниями и событиями: каждое состояние может быть причиной какого-либо события и в то же время состояние является следствием какого-то события. Аналогично каждое событие является причиной изменения состояния и в то же время событие является следствием какого-то состояния. На одном периоде между двумя операциями периодического контроля имеют место переходы в непрерывном времени, обусловленные отказами и происходящие в непрерывном времени. Этот процесс описывается теорией марковских процессов в непрерывном времени. После выполнения операции периодического контроля происходит переход в работоспособное состояние, если контролю подвергается работоспособный объект. Если объект оказался в неработоспособном состоянии, то он направляется на техническое обслуживание. Эти переходы в дискретные моменты времени описываются полумарковскими процессами. Для полного понимания излагаемого материала приведен перечень используемых терминов, взятых из государственных стандартов.* **Результаты.** *При принятых видах отказов на одном периоде контроля переходы между состояниями описываются в непрерывном времени, а после проведения операции контроля – в дискретном времени. На каждом периоде контроля составляется и решается система дифференциальных уравнений при начальном работоспособном состоянии. По полученным вероятностям вычисляются вероятности периода без отказа и с отказом, а также средняя продолжительность работоспособного и неработоспособного состояний на периоде с отказом. При обнаружении отказов происходит переход в состояние технического обслуживания. Вероятность такого перехода находится в рамках теории полумарковского процесса. По вероятностям полумарковского процесса вычисляются средние числа периодов без отказа. Такая модель адекватно отражает процессы надежности эксплуатируемого оборудования. При отклонении от такого подхода показатели надежности могут принимать существенно отличающиеся расчетные значения. Приведены три примера диаграмм состояний-переходов: с учетом только явных отказов, только скрытых отказов и с совместным учетом этих отказов.* **Обсуждение и выводы.** *Изложенный подход с использованием постоянного (регулярного) периода контроля позволяет формировать модели, адекватно отражающие процессы в реальных системах. Все операции по реализации моделируемых процессов выполняются на основе теории марковских процессов в непрерывном времени и полумарковских процессов. Эти операции выполняются в матричном виде. Такой подход дает возможность выполнять математические операции с применением средств компьютерной математики. Изложенный подход может быть использован для совершенствования моделей надежности технических систем.*

Abstract. *State-transition diagrams are given for the situation of monitoring that takes into consideration explicit and hidden failures.* **Aim.** *To generate state-transition diagrams that are used in the development of the dependability model and associated calculation methods under conditions of periodic monitoring.* **Methods.** *The method is based on the classification of failures by detection, i.e., explicit and hidden failures. Accordingly, facility condition inspection may be continuous and/or periodical. Periodical inspection is conducted at equal intervals. The state-transition diagram is generated taking into consideration the relations between the states and events, i.e., each state can be the cause of a certain event and, at the same time, a state is the consequence of an event. Similarly, each event is the cause of a state change,*

while at the same time being a consequence of a state. Within the time between two periodic inspections, continuous-time transitions take place due to failures. This process is described by the theory of continuous-time Markov processes. Upon the completion of a periodic inspection operation, the up state ensues if an operable item is subjected to inspection. If an item proves to be down, it is submitted to maintenance. Such transitions in discrete moments in time are described by semi-Markov processes. For a better understanding of the information set forth in the paper, a list is provided of the used terminology referring to state standards. **Results.** *Under the adopted failure modes within a single inspection period, state transitions are described in continuous time, while after the inspection operation they are described in discrete time. Within each inspection period, a system of differential equations is defined and solved based on the assumption of initial up state. Based on the deduced probabilities, the probabilities of a period without failures and with a failure are calculated along with the mean time of up and down states within the period with a failure. Should failures be detected, maintenance state is initiated. The probability of such transition is within the theory of semi-Markov processes. Based on the probabilities of the semi-Markov process, the mean failure-free periods are calculated. Such model adequately reflects the dependability processes of operated equipment. If the method is not fully observed, the dependability indicators may take significantly different values. Three examples of state-transition diagrams are given: taking into account only explicit failures, only hidden failures and both.* **Discussion and conclusions.** *The presented approach with a constant (regular) inspection period allows building models that adequately reflect processes occurring in actual systems. All operations involved in the implementation of simulated processes are performed based on the theory of continuous-time Markov processes and semi-Markov processes. The operations are performed in matrix form. Such method enables mathematical operations using computers. The presented approach can be used for improving dependability models of technical systems.*

Ключевые слова: *контроль состояния, скрытый отказ, явный отказ.*
Keywords: *state supervision, hidden failure, explicit failure.*

Для цитирования*: Зеленцов Б.П. Формирование диаграмм состояний-переходов в условиях мониторинга технического состояния // Надежность. 2022. №2. С. 22-29. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-22-29*
For citation*: Zelentsov B.P. Defining state-transition diagrams as part of technical state monitoring. Dependability 2022;2:22-29. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-22-29*

Поступила *25.02.2022 г. /* **После доработки** *26.04.2022 г. /* **К печати** *17.06.2022 г.*
Received on: *25.02.2022 /* **Revised on:** *26.04.2022 /* **For printing:** *17.06.2022.*

Введение

Оборудование технических систем различного назначения обычно относится к сложным системам длительного использования. Одной из проблем исследования таких систем является построение моделей реальных систем, которые пригодны для теоретического и экспериментального изучения их свойств. Математическое моделирование является наиболее распространенным и перспективным методом изучения сложных систем, который позволяет проводить исследование на этапе проектирования, решать задачи анализа и синтеза, прогнозировать эффективность функционирования, обосновывать необходимую или оптимальную структуру при проектировании новых и совершенствовании существующих систем и правильно интерпретировать статистические данные.

Следует отметить, что на сложные системы в условиях эксплуатации воздействуют различные случайные факторы, ввиду чего вероятностные закономерности являются превалирующими при их моделировании. Детерминированные закономерности накладываются на случайные факторы, что определяет специфику модели в каждом конкретном случае. Такие особенности актуальны для систем с механическим, электромеханическим и электронным оборудованием.

Надежность объектов зависит от многих факторов. В настоящей статье рассмотрены виды отказов по признаку их обнаружения и система мониторинга, которая заключается в наблюдении за объектом с целью получения информации о его техническом состоянии и рабочих параметрах. Исследование надежности объектов с учетом мониторинга технического состояния продолжает оставаться актуальным, поскольку это является составной частью проектирования и совершенствования технических систем.

Целью статьи является составление модели надежности объекта с постоянным периодом между проверками с учетом приведенных условий и ограничений.

Обзор источников

В научной и учебной литературе, а также в нормативных документах приводятся различные виды диаграмм состояний-переходов, в которых учтена специфика мо-

делируемых систем и их оборудования. При построении моделей надежности учитываются следующие факторы:

- различные виды отказов;
- применение системы мониторинга технического состояния;
- использование системы технического обслуживания;
- применение технического обслуживания с периодическим или непрерывным контролем;
- возможность ошибок контроля I и II рода

и многое другое.

Необходимость моделирования процессов, связанных с мониторингом технического состояния объектов, подтверждается во многих исследованиях, например, [1, 2, 3].

Во многих исследованиях процесс переходов между состояниями описывается моделью в непрерывном времени. При этом, как правило, продолжительность нахождения в состояниях или продолжительность до событий распределена по показательному закону с постоянной интенсивностью. В частности, по показательному закону распределена также продолжительность между операциями контроля технического состояния [1, 4, 5, 6, 7, 8].

Если при эксплуатации объекта имеют место только явные отказы, то система мониторинга обнаруживает такой отказ в момент его возникновения, при этом начиная с момента отказа может производиться техническое обслуживание с непрерывным контролем. Этот простейший случай, включающий два состояния, представлен в [9]. Объект используется по назначению до появления отказа. Возникновение отказа совмещено с началом восстановления, то есть неработоспособное состояние совмещено с восстановлением и начинается оно в момент появления отказа. Из такого представления следует сделать вывод о том, что в этом случае имеет место явный отказ, ввиду этого организация мониторинга технического состояния не является актуальной.

Другие варианты отказов и восстановления в [9] также включают только явные отказы. Подобная ситуация с учетом только явных отказов повторяется во многих публикациях, посвященных моделированию надежности технических систем. Итак, в этом стандарте не содержится информация о виде отказа. Кроме того, приведенные диаграммы не содержат информации о мониторинге технического состояния и/или о техническом диагностировании объекта, а состояния и переходы полностью не раскрыты. Например, после восстановления отказавшего объекта он переводится в ухудшенное состояние, то есть восстановление полностью не устраняет отказ. С этим нельзя согласиться.

В [10] исследованы диаграммы состояний-переходов для разных вариантов систем: одиночный объект, последовательное, параллельное и другие соединения элементов системы, резервированные системы из однотипных элементов с активным и пассивным резервом, системы без восстановления и с восстановлением. Во всех вариантах восстанавливаемых систем после отказа объекта или элемента системы начинается восстановление. Это означает, что учитываются только явные отказы, а скрытые отказы и система их обнаружения в этих моделях не учитываются. Следует также отметить, что процессы, моделируемые диаграммами состояний-переходов, происходят в непрерывном времени.

В [11] изложена система контроля технического состояния в процессе эксплуатации объекта. Для обнаружения отказов разного вида использован непрерывный и периодический контроль, при этом периодический контроль проводится со случайным периодом. Кроме того, учитывается также уровень достоверности контроля.

Работа [12] посвящена оптимизации периодичности контроля защищенности компьютерных систем. Все процессы протекают в непрерывном времени, продолжительности всех состояний являются случайными и распределены по показательному закону с постоянной интенсивностью, в том числе продолжительность интервала тестирования. Обоснование показательного распределения для интервалов тестирования не приводится. По некоторым критериям производится оптимизация среднего значения интервала тестирования.

Автор опирается на терминологию, установленную в государственных стандартах. Для полного и однозначного понимания приведен перечень используемых терминов.

Используемые термины и их определения

Вид отказа: Способ и характер возникновения отказа объекта (Failure mode) [13].

Внезапный отказ: Отказ, характеризующийся скачкообразным переходом объекта в неработоспособное состояние (Sudden failure) [14].

Восстановление: Процесс и событие заключающиеся в переходе объекта из неработоспособного состояния в работоспособное (Restoration) [14].

Диаграмма состояний-переходов: Диаграмма, показывающая совокупность возможных состояний и возможных пошаговых переходов между состояниями (State-transition diagram) [15].

Интенсивность отказов: Условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник (Failure rate) [14].

Контроль состояния: Операции, выполняемые автоматически или вручную с целью определения и квалификации состояния (Condition monitoring) [15].

Коэффициент готовности: Вероятность того, что объект окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени, кроме планируемых периодов, в течение которых его применение по назначению не предусмотрено (Availability factor) [16].

Коэффициент технического использования: Отношение математического ожидания суммарного времени

пребывания объекта в работоспособном состоянии за некоторый период эксплуатации к математическому ожиданию суммарного времени пребывания объекта в работоспособном состоянии и простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом, за тот же период (Utilization factor) [16].

Модель надежности: Математическая модель объекта, используемая для прогнозирования и расчета надежности (Dependability model) [14].

Мониторинг технического состояния: Составная часть технического обслуживания, заключающаяся в наблюдении за объектом с целью получения информации о его техническом состоянии и рабочих параметрах (Condition monitoring) [14].

Начальное состояние: Состояние объекта в момент времени $t = 0$ (Initial state) [9].

Неработоспособное состояние: Состояние объекта, в котором он не способен выполнять хотя бы одну требуемую функцию (Down state) [14].

Отказ: Событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта (Failure) [14].

Периодичность технического обслуживания: Интервал времени или наработки между данным видом технического обслуживания и последующим таким же видом (Maintenance period) [16].

Поглощающее состояние: Состояние, из которого переходы невозможны (Absorbing state) [9].

Постепенный отказ: Отказ, возникающий в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров объекта (Gradual failure) [14].

Работоспособное состояние: Состояние объекта, в котором он способен выполнять требуемые функции (Up state) [14].

Скрытый отказ: Отказ, не обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования, но выявляемый при проведении технического обслуживания или специальными методами диагностики (Latent failure) [14].

Средняя продолжительность неработоспособного состояния: Математическое ожидание продолжительности неработоспособного состояния (Mean down time) [15].

Средняя продолжительность работоспособного состояния: Математическое ожидание продолжительности работоспособного состояния (Mean up time) [15].

Техническое диагностирование: Процесс определения технического состояния объекта (Technical diagnosis) [16].

Техническое обслуживание: Совокупность всех технических и организационных действий, направленных на поддержание или возвращение изделия в работоспособное состояние (Maintenance) [15].

Техническое обслуживание с непрерывным контролем: Техническое обслуживание, предусмотренное документацией и выполняемое по результатам непрерывного контроля технического состояния объекта (Maintenance with continuous control) [16].

Техническое обслуживание с периодическим контролем: Техническое обслуживание, выполняемое при контроле технического состояния объекта в объеме и с периодичностью, установленной в документации (Maintenance with periodic control) [16].

Техническое состояние: Состояние объекта, характеризуемое совокупностью установленных в документации параметров, описывающих его способность выполнять требуемые функции в рассматриваемых условиях (Technical condition) [14].

Явный отказ: Отказ, обнаруживаемый визуально или штатными методами и средствами контроля и диагностирования при подготовке объекта к применению или в процессе его применения (Explicit failure) [14].

Концептуальная модель

Прежде всего, отметим несколько особенностей, связанных с моделированием мониторинга технических систем. В реальных технических системах имеют место различные виды отказов и различные модификации мониторинга, которые следует учитывать при моделировании процессов, связанных с надежностью. В связи с этим возможны следующие виды мониторинга, которые названы условно. Идеальный мониторинг, при котором обнаруживаются все виды отказов, из чего следует, что все виды отказов являются явными. Достоверный мониторинг, при котором обнаруживаются виды отказов, предусмотренные документацией. Недостоверный мониторинг, при котором возможны ошибки при выполнении операций контроля технического состояния объекта.

Приведенные соображения могут быть уточнены и расширены с учетом различных видов отказов и специфических особенностей мониторинга, заложенного в техническое обслуживание систем технического назначения.

В настоящей статье виды отказов рассматриваются по признаку их обнаружения: явные отказы и скрытые отказы. Явные отказы обнаруживаются в момент их возникновения, а скрытые отказы – при выполнении операций периодического контроля в рамках мониторинга технического состояния. Ввиду этого при возникновении явного отказа использование объекта по назначению прерывается, то есть неработоспособное состояние после явного отказа отсутствует. После возникновении скрытого отказа объект переходит в неработоспособное состояние. При таком подходе явный отказ может быть после скрытого, однако скрытый отказ после явного произойти не может. Такая ситуация возможна для технических систем, в частности, для электронного оборудования систем различного назначения.

В некоторых научных работах вид отказа устанавливается по скорости изменения параметров: внезапные и постепенные. Здесь имеется в виду, что скрытый отказ может быть внезапным или постепенным, а явный отказ – внезапным или постепенным, переходящим из скрытого в явный.

Техническое обслуживание производится с целью перевода объекта из неработоспособного состояния в работоспособное. При этом техническое обслуживание может быть с периодическим или непрерывным контролем.

В соответствии с изложенным представлением периодом контроля является продолжительность между двумя операциями контроля. На одном периоде между операциями контроля технического состояния отказ может произойти или не произойти. Поэтому период контроля может быть двух типов:

• без отказа (объект является работоспособным на всем периоде);

• с отказом (в течение периода происходит отказ).

На периоде без отказа операция контроля подтверждает работоспособное состояние и объект продолжает использоваться по назначению. Если объект отказывает на периоде, то отказ обнаруживается системой контроля и объект направляется на техническое обслуживание.

Примечание. Периодичность контроля следует отличать от периодичности технического обслуживания. Задачи, связанные с периодичностью технического обслуживания, здесь не рассматриваются. После проведения технического обслуживания работоспособный объект, как правило, используется по назначению в работоспособном состоянии.

Приняты следующие условия и ограничения, согласованные с используемой терминологией.

1. При использовании объекта по назначению могут произойти скрытые и/или явные отказы.

2. Явные отказы обнаруживаются непрерывным контролем, а скрытые отказы – периодическим контролем.

3. Как явные, так и скрытые отказы имеют показательное распределение и характеризуются соответствующими постоянными интенсивностями отказов $\lambda_я$ и $\lambda_с$.

4. Контроль технического состояния производится периодически с постоянным (регулярным) периодом T между операциями контроля.

5. Контроль технического состояния является достоверным.

6. В состоянии восстановления или технического обслуживания объект не выполняет требуемые функции, то есть в этих состояниях применение объекта по назначению не предусматривается.

7. Работоспособное состояние всегда является начальным после технического обслуживания.

8. Продолжительность операций контроля технического состояния принята пренебрежимо малой по сравнению с периодом контроля T.

Последнее допущение принято для упрощения модели. Такое допущение позволяет учесть влияние различных факторов в «чистом виде». В частности, в соответствии с установленными нормами коэффициент готовности является вероятностью работоспособного состояния без учета планируемых периодов, в течение которых применение объекта по назначению не предусмотрено. В случае необходимости учесть конечное время нахождения в состояниях контроля и восстановления в рамках данной модели не составляет затруднений.

Формирование диаграмма состояний-переходов

Следует отметить, что в опубликованных исследованиях имеются много вариантов диаграмм состояний-переходов, которые зависят от особенностей используемого оборудования и традиций составления математических моделей. В частности, в некоторые модели заложены различные виды отказов, предотказы оборудования, а также различные системы мониторинга технического состояния. Диаграмма состояний-переходов должна содержать все причинно-следственные соотношения между состояниями и событиям и в то же время удовлетворять требованиям государственных стандартов.

При формировании диаграммы состояний-переходов следует учитывать причинно-следственные связи между состояниями и событиями. Каждое состояние может быть причиной какого-либо события и в то же время состояние является следствием какого-то события. Аналогично каждое событие является причиной изменения состояния и в то же время событие является следствием какого-то состояния.

В соответствии с используемым определением коэффициента готовности при расчетах принимаются во внимание продолжительности работоспособных и неработоспособных состояний, то есть состояний, в которых объект используется по назначению, а продолжительность операций контроля и состояния технического обслуживания не учитываются. Продолжительность операций контроля и состояний технического обслуживания учитывается при расчете коэффициента технического использования.

При построении диаграмм приняты следующие обозначения состояний: Р – работоспособное состояние объекта; $Н_С$ – состояние объекта со скрытым отказом; КР – контроль состояния объекта на периоде без отказа; $КН_я$ – контроль состояния объекта при возникновении явного отказа; $КН_С$ – контроль неработоспособного состояния объекта со скрытым отказом; ТО техническое обслуживание объекта.

Математическая модель

Как было отмечено, в некоторых публикациях продолжительность между операциями контроля технического состояния принимается распределенной по показательному закону с постоянной интенсивностью. При таком допущении формируется математическая модель и приводятся методы вычисления показателей надежности. Прежде чем использовать такую модель, следует обосновать это показательное распределение. В большинстве случаев такое обоснование не приводится.

При постоянном (регулярном) времени между операциями контроля использование объекта по назначению разбивается на интервалы времени с постоянной продолжительностью. При этом между двумя последовательными операциями контроля переходы между состояниями происходят в непрерывном времени, а при проведении операции контроля – в дискретные моменты времени. Поэтому представление процесса эксплуатации только в непрерывном времени неприемлемо.

На каждом периоде вероятности состояний являются решением системы дифференциальных уравнений. По этим вероятностям могут быть вычислены:

1) средние времена нахождения в состояниях;

2) вероятности периодов без отказа и с отказом.

Последние вероятности зависят не только от интенсивностей отказов, но и от периода контроля T. Они являются исходными для описания смены состояний с помощью полумарковского процесса. Процесс смены состояний полумарковского процесса задается вероятностями p_{ij}. Вероятностью p_{ij} является условной вероятностью непосредственного перехода из состояния s_i в состояние s_j при условии, что состояние s_i меняется. Вероятности p_{ij} описывают процесс только в момент перемены состояния.

Переходы между состояниями при обнаружении отказов могут быть описаны с помощью полумарковского процесса [17, 18]. По этим вероятностям вычисляются средние числа вхождений (попаданий) в состояния, что используется для вычисления различных характеристик процесса и показателей надежности. В частности, такой подход позволяет рассчитать среднюю продолжительность работоспособного и неработоспособного состояния между двумя последовательными техническими обслуживаниями.

Примеры построения диаграмм состояний

Приведем несколько диаграмм с различными представлениями явных и скрытых отказов. В каждом примере используется разная нумерация состояний, но приведенные обозначения и их определения сохраняются. Изменение нумерации состояний не изменяет числовые характеристики процесса.

Рассмотрим сначала случай, когда система мониторинга позволяет обнаруживать все виды отказов в момент их возникновения. Это означает, что имеют место только явные отказы. Контроль состояния практически совпадает с появлением явного отказа. После обнаружения явного отказа объект направляется на техническое обслуживание. Очевидно, что необходимости в периодическом контроле нет. Соответствующая диаграмма приведена на рис. 1. Период использования по назначению продолжается от момента завершения технического обслуживания до момента появления явного отказа и его обнаружения. Этот простейший вариант приведен в [9]. Средняя продолжительность работоспособного состояния равна $1 / \lambda_я$, а неработоспособное состояние отсутствует. Поэтому коэффициент готовности с учетом принятых условий равен 1.

Рис. 1. Диаграмма состояний-переходов с учетом только явных отказов

В следующей диаграмме учтены только скрытые отказы. Поскольку скрытые отказы выявляются при проведении операций периодического контроля, то продолжительность периода контроля без отказа и с отказом одна и та же. Использование по назначению продолжается до возникновения скрытого отказа и его обнаружения при очередной операции периодического контроля [19]. Соответствующая диаграмма приведена на рис. 2.

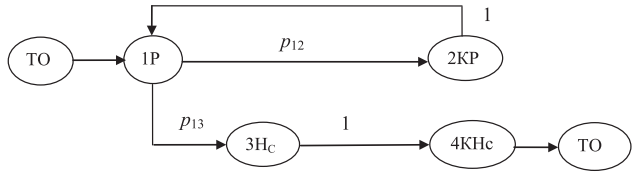


Рис. 2. Диаграмма состояний-переходов с учетом только скрытых отказов

Далее приведена диаграмма при наличии явных и скрытых отказов. Как было отмечено ранее, явный отказ может наступить после скрытого. При наступлении только скрытого отказа он обнаруживается при очередной операции периодического контроля и объект направляется на техническое обслуживание. При наступлении явного отказа он обнаруживается внутри периода контроля и после этого объект направляется на техническое обслуживание. Диаграмма состояний-переходов приведена на рис. 3. Из приведенных диаграмм видно различие между явными и скрытыми отказами: при скрытом отказе имеется часть периода контроля, на которой объект находится в неработоспособном состоянии, а после явного отказа такая часть отсутствует.

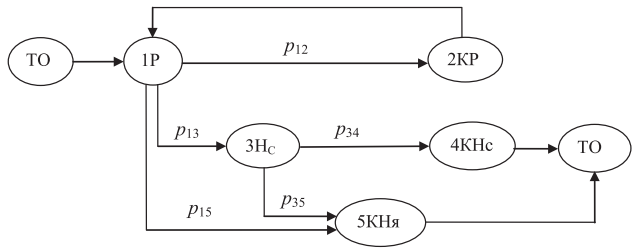


Рис. 3. Диаграмма состояний-переходов с учетом явных и скрытых отказов

Результаты

При моделировании процессов надежности с учетом явных и скрытых отказов и при постоянном периоде контроля целесообразно исследовать два процесса: в

непрерывном времени между двумя операциями контроля и в дискретном времени по результатам контроля технического состояния. В непрерывном времени вычисляются продолжительности работоспособных и неработоспособных состояний и переходные вероятности полумарковского процесса.

Таким образом, основная идея, изложенная в настоящей статье, заключается в совместном использовании двух моделей: в непрерывном времени и в дискретном времени. Переходы в непрерывном времени обусловлены явными и скрытыми отказами, а переходы в дискретном времени обусловлены результатами контроля технического состояния.

Приведенный подход с использованием периодического контроля с постоянным (регулярным) периодом может быть использован для моделирования процессов надежности как для относительно простых случаев, так и для более сложных вариантов, в которых учитывается недостоверность операций контроля, использование предотказов, последствия от отказов разного вида и др.

Обсуждение и выводы

При проектировании и совершенствовании обслуживания оборудования технических систем следует принимать во внимание явные и скрытые отказы и вид периодичности контроля технического состояния. В аналитических моделях, применяемых для описания мониторинга технических систем, зачастую используют случайный период между проверками. Использование в таких моделях разных способов задания периодичности контроля может существенно изменить расчетные значения показателей надежности.

Изложенный подход с использованием постоянного (регулярного) периода контроля позволяет формировать модели, адекватно отражающие процессы в реальных системах. Все операции по реализации моделируемых процессов выполняются на основе теории марковских процессов в непрерывном времени и полумарковских процессов. Эти операции целесообразно выполнять в матричном виде [20]. Такой подход дает возможность использовать средства компьютерной математики для проведения численных расчетов. Пример модели надежности с описанием процессов в непрерывном и дискретном времени приведен в [21].

Следует отметить, что приведенные соображения отражают мнение автора. Они имеют методический характер и могут быть полезны при формировании адекватных моделей надежности технических объектов и систем.

Библиографический список

1. Острейковский В.А. Теория надежности. М.: Высшая школа, 2003. 463 с.

2. Шайхутдинов Д.В. Методы мониторинга и диагностики сложных технических систем на базе имитационного моделирования // Современные наукоемкие технологии. 2018. № 11 (часть 1). С. 146-153.

3. Егунов М.М., Шувалов В.П. Резервирование и восстановление в телекоммуникационных сетях // Вестник СибГУТИ. 2012. № 2. С. 3-9.

4. Лубков Н.В., Спиридонов И.Б., Степанянц А.С. Влияние характеристик контроля на показатели надежности систем // Труды МАИ. 2016. Выпуск 85. С. 1-27.

5. Кельберт М.Я., Сухов Ю.М. Вероятность и статистика в примерах и задачах. Том 2: Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов. М.: МЦНМО, 2009. 588 с.

6. Половко А.М., Гуров С.М. Основы теории надежности. БХВ-СПБ, 2008. 702 с.

7. Рахман П.А. Показатели надежности восстанавливаемых систем с заданным порогом аварийного отключения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 9. С. 146-153.

8. O'Connor P.D.T., Klener A. Practical Reliability Engineering: 5th ed. John Wiley & Sons, 2012. 504 p.

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

10. Birolini A. Reliability Engineering. Nheory and Practice: 8th ed. Springer, 2017. 651 p.

11. Ушаков И.А. Курс теории надежности систем. М.: Дрофа, 2008. 239 с.

12. Богатырев В.А., Богатырев А.В. Оптимизация периодичности контроля защищенности компьютерных систем // Научно-технический вестник информационных технологий и оптики. 2015. Т.15. № 2. С. 300-304.

13. ГОСТ Р 51901.12-2007. Менеджмент риска. Методы анализа видов и последствий отказов. М.: Стандартинформ, 2008. IV, 35 с.

14. ГОСТ 27.002-2015. Надежность в технике. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. IV, 23 с.

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

16. ГОСТ 18322-2016. Система технического обслуживания и ремонта техники. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2017. II, 13 с.

17. Королюк В.С., Турбин А.Ф. Полумарковские процессы и их приложения. Киев: Наукова думка, 1982. 236 с.

18. Сильвестров Д.С. Полумарковские процессы с дискретным множеством состояний. М.: Сов радио, 1980. 272 с.

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

20. Зеленцов Б.П. Матричные методы моделирования однородных марковских процессов. Palmarium Academic Publishing, 2017. 133 с.

21. Зеленцов Б.П. Модель системы мониторинга объекта при недостоверном контроле // Надежность. 2020. № 4. С. 3-12.

References

1. Ostreykovsky V.A. Dependability theory. Moscow: Vysshaya Shkola, 2003. (in Russ.)

2. Shaykhutdinov D.V. Methods for dynamic complex technical systems monitoring and diagnosis based on imitation simulation. *Modern High Technologies* 2018;11(1):146-153. (in Russ.)

3. Egunov M.M., Shuvalov V.P. Reservation and restoration in telecommunication networks. *Vestnik SibGUTI* 2012;2:3-9. (in Russ.)

4. Lubkov N.V., Spiridonov I.B., Stepaniants A.S. [The effect of inspection characteristics on the dependability indicators of systems]. *Trudy MAI* 2016;85:1-27. (in Russ.)

5. Kelbert M.Ya., Sukhov Yu.M. [Probability and statistics in examples and problems. Vol. 2: Markov chains as the foundation of the theory of random processes]. Moscow: MCCME; 2009. (in Russ.)

6. Polovko A.M., Gurov S.M. [Introduction into the dependability theory]. BHV-SPB; 2008. (in Russ.)

7. Rahman P.A. Reliability indices of repairable systems with predefined threshold of emergency shutdown. *International Journal of Applied and Fundamental Research* 2015;9:146-153. (in Russ.)

8. O'Connor P.D.T., Klener A. Practical Reliability: 5th ed. John Wiley & Sons; 2012.

9. GOST R IEC 61165-2019. Dependability in technics. Application of Markov techniques. Moscow: Standartinform; 2019. (in Russ.)

10. Birolini A. Reliability Engineering. Theory and Practice. 8th edition. Springer; 2017.

11. Ushakov I.A. [Course of systems dependability theory]. Moscow: Mir; 2008.

12. Bogatyrev V.A., Bogatyrev A.V. Frequency optimization for security monitoring of computer systems. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics* 2015;15(2):300-304. (in Russ.)

13. GOST R 51901.12-2007. Risk management. Procedure for failure mode and effects analysis. Moscow: Standartinform; 2008. (in Russ.)

14. GOST 27.002-2015. Dependability in technics. Terms and definitions. Moscow: Standartinform; 2016. (in Russ.)

15. GOST R 53480-2009. Dependability in technics. Terms and definitions. Moscow: Standartinform; 2010. (in Russ.)

16. GOST 18322-2016. Maintenance and repair system of engineering. Terms and definitions. Moscow: Standartinform; 2017. (in Russ.)

17. Koroliuk V.S., Turbin A.F. [Semi-Markovian processes and their applications]. Kiev: Naukova dumka; 1982. (in Russ.)

18. Silvestrov D.S. [Semi-Markov processes with discrete set of states]. Moscow: Sovietskoye Radio; 1980. (in Russ.)

19. Zelentsov B.P., Trofimov A.S. Research models of reliability calculation with different ways of task the periodic inspection. *Reliability and Quality of Complex Systems* 2019;1(25):35-44. (in Russ.)

20. Zelentsov B.P. [Matrix methods of simulating homogeneous Markov processes]. Academic Publishing; 2017. (in Russ.)

21. Zelentsov B.P. Model of item monitoring system in presence of inspection errors. *Dependability* 2020;4:3-12.

Сведения об авторе

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

About the author

Boris P. Zelentsov, Doctor of Engineering, Professor of the Department of Further Mathematics, Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences, Novosibirsk, Russian Federation, e-mail: zelentsovb@mail.ru.

Вклад автора в статью

Автор изложил подход к использованию диаграмм состояний-переходов с регулярным периодом контроля, что позволяет формировать модели надежности, адекватно отражающие процессы в реальных системах.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Надежность, том 22, №2, 2022 / Dependability 2, 2022
Системный анализ. Структурная надежность

УДК 519.248:62-192
Оригинальная статья / Original article
https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-30-37

Улучшение эффективности оценок показателей надежности различных планов испытаний однородной продукции

Improving the efficiency of estimation of the dependability indicators of various test plans of homogeneous product

Виктор С. Михайлов, *Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт химии и механики им. Д.И. Менделеева», Москва, Российская Федерация*
Viktor S. Mikhailov, *D.I. Mendeleev Central Research and Design Institute of Chemistry and Mechanics, Moscow, Russian Federation*
mvs1956@list.ru

Виктор С. Михайлов

Резюме. *Улучшение эффективности оценок различных планов испытаний однородной продукции основано на использовании критерия эффективности смещенных оценок C( ), где – некоторая оценка параметра. Процесс выбора эффективных смещенных оценок включает: предлагаемые оценки должны быть строго монотонны по всем своим параметрам; выбираются оценки с минимальным смещением A( ) = b^2 или близкими к таковым. Если в процессе выбора из числа предложенных оценок оказалась единственная несмещенная оценка, то она и является эффективной. Для того, чтобы эта оценка оказалась эффективной в классе несмещенных оценок, необходимо доказать неравенство Крамера-Рао для этой оценки; исключаются оценки для которых выполняется неравенство A = b^2 > D, т.е. смещение превалирует над разбросом значений этой оценки; выбираются оценки, для которых выполняется неравенство D/A > 4, т.е. оценки, для которых их реализации группируются вокруг истинного количественного значения оцениваемого параметра с разных сторон; среди оставшихся оценок выбираются оценки с минимальным смещением A( ) = b^2. В случае единственной выбранной оценки с минимальным смещением A эта оценка признается эффективной; в случае с равными A в качестве эффективной среди них выбирается оценка с минимальной дисперсией. В качестве критерия эффективности смещенных оценок устанавливается характеристика C( ) = D·b^2. Предлагаемые оценки вероятности безотказной работы (вероятности отказа) должны быть: строго монотонны по всем своим параметрам, не равны нулю и единице.* **Цель работы.** *Целью работы является получение эффективных оценок вероятности безотказной работы для биномиального плана испытаний и плана испытаний с ограниченным временем и восстановлением при использовании критерия эффективности смещенных оценок.* **Методы исследования.** *Для нахождения эффективной по смещению оценки использовались интегральные числовые характеристики точности оценки, а именно: суммарный квадрат смещения ожидаемой реализации некоторого варианта оценки от исследуемых параметров законов распределений и т.д.* **Выводы.** *Получены эффективные по смещению оценки вероятности безотказной работы для биномиального плана испытаний и плана испытаний с ограниченным временем и восстановлением. Полученные оценки вероятности безотказной работы имеют направленность практического применения при испытаниях и эксплуатации изделий различного назначения, в процессе которых отказы не возникали.*
Abstract. *Improving the efficiency of comparison of various test plans for homogeneous products is based on the use of the efficiency criterion of biased estimates C( ), where is a certain parameter estimate. The process of selecting efficient biased estimates involves the following: all parameters of the submitted estimates are to be strictly monotone; the estimates with minimal bias A( ) = b^2 or close to it are chosen. If, in the process of selection out of the proposed estimates, there is a single unbiased estimate, then the latter is the efficient one. For this estimate to be efficient in the class of unbiased estimates, it is required to prove the Cram r-Rao inequality for such estimate; estimates, for which inequality A = b^2 > D is fulfilled, i.e., the bias prevails over the value scatter of such estimate, are excluded; estimates are selected, for which the inequality D/A > 4 is fulfilled, i.e., the estimates, for which the realizations are grouped around the true quantitative value of the estimated parameter from different sides; out of the remaining estimates, the estimate with the minimum bias A( ) = b^2 is selected. In case a single estimate with minimum bias A has been selected, such estimate is considered efficient; in case A are equal, the estimate with minimal variance is chosen as the efficient one. As the efficiency criterion of biased estimates, characteristic C( ) = D·b^2 is specified. The suggested probability of no-failure (failure) estimates are to be strictly monotone in terms of all parameters and not equal to zero or one.* **The Aim of the paper.** *The paper aims to obtain*

efficient estimates of the probability of no-failure for the binomial test plan and the test plan with limited time and recovery using the efficiency criterion of biased estimates. **Methods of research.** *A bias-efficient estimate was found using integral numerical characteristics of estimation accuracy, i.e., total squared bias of the expected realization of a certain estimate off of the examined parameters of the distribution laws, etc.* **Conclusions.** *Bias-efficient estimates were obtained of the probability of no-failure for the binomial test plan and the test plan with limited time and recovery. The obtained probability of no-failure estimates are practically applicable as part of testing and operation of various products not associated with failures.*

Ключевые слова: *оценка, эффективная оценка, критерий эффективности, план испытаний, смещенные оценки.*
Keywords: *estimation, efficient estimation, criterion of efficiency, test plan, biased estimates.*

Для цитирования: *Михайлов В.С. Улучшение эффективности оценок показателей надежности различных планов испытаний однородной продукции // Надежность. 2022. №2. С. 30-37. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-30-37*
For citation: *Mikhailov V.S. Improving the efficiency of estimation of the dependability indicators of various test plans of homogeneous product. Dependability 2022;2:30-37. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-30-37*

Поступила *28.03.2022 г.* / **После доработки** *11.05.2022 г.* / **К печати** *17.06.2022 г.*
Received on: *28.03.2022* / **Revised on:** *11.05.2022* / **For printing:** *17.06.2022.*

Улучшение эффективности оценок различных планов испытаний однородной продукции [1] основано на использовании критерия эффективности смещенных оценок $C(\theta)$ [2], где θ – некоторая оценка параметра. Обозначим через $A(\theta)$ суммарное смещение оценки θ от оцениваемого параметра t, а через $B(\theta)$ – суммарное уклонение оценки θ от оцениваемого параметра t. Заметим, что суммирование происходит в рабочем диапазоне по всем значениям оцениваемого параметра t, так и по всем значениям параметров плана испытаний и иных параметров, например, время за которое оценивается вероятность безотказной работы (ВБР).

Для нужд построения критерия эффективности смещенных оценок будем произвольную статистическую оценку θ характеризовать смещением и дисперсией. Обозначим через $b = E(\theta) - t$ смещение оценки θ от параметра t, где E – математическое ожидание, а через D – дисперсию оценки θ. Тогда уклонение (в среднем квадратичном смысле) некоторой оценки θ от оцениваемого параметра t выражается формулой [2, 3, 4]:

$$B(\theta) = E(\theta - t)^2 = D + b^2. \quad (1)$$

Заметим, что уклонение, как характеристика эффективности, при изменении дисперсии тоже изменяется на эту величину (см. формулу (1)). Т.е. ее изменение происходит без учета зависимости от конкретной величины смещения оценки. Попытаемся связать дисперсию и квадрат смещения так, чтобы при изменении дисперсии уклонение менялось с учетом смещения. Учтем, что смещение является первичным фактором при выборе эффективной оценки в классе смещенных оценок. И потребуем от вновь построенной характеристики $C(\theta)$, чтобы при изменении дисперсии на величину δD для небольших смещений $b \approx 0 + \delta$ учет влияния смещения на характеристику был незначительным, и наоборот, для больших смещений $b >> 0$ учет влияния смещения на характеристику $C(\theta)$ был значительным. И потребуем, чтобы изменение характеристики $C(\theta)$ было линейным относительно характеристик D и b^2. Этим требованиям наиболее полно подходит произведение характеристик D и b^2, которое и является критерием эффективности смещенных оценок [2]:

$$C(\theta) = D \cdot b^2. \quad (2)$$

В случае несмещенных оценок такой характеристикой (критерием) служит уклонение $B(\theta)$ (см. формулу (1)).

Сформулируем требования к процессу выбора в классе смещенных оценок эффективных оценок:

– предлагаемые оценки должны быть строго монотонны по всем своим параметрам;

– выбираются оценки с минимальным смещением $A(\theta) = b^2$ или близкими к таковым. Если в процессе выбора из числа предложенных оценок оказалась единственная несмещенная оценка, то она и является эффективной. Для того, чтобы эта оценка оказалась эффективной в классе несмещенных оценок, необходимо доказать неравенство Крамера-Рао для этой оценки;

– выбираются оценки, для которых выполняется неравенство $D > 4A$, т.е. оценки, для которых их реализации группируются вокруг истинного количественного значения оцениваемого параметра с разных сторон; и исключаются оценки для которых выполняется обратное неравенство $4b^2 > D$, т.е. смещение превалирует над разбросом значений этой оценки;

– среди оставшихся оценок выбираются оценки с минимальным смещением $A(\theta) = b^2$. В случае единственной выбранной оценки с минимальным смещением A эта оценка признается эффективной по смещению;

– в случае с равными A в качестве эффективной по смещению выбирается оценка с минимальной дисперсией.

В качестве критерия эффективности оценок по смещению устанавливается характеристика $C(\theta) = D \cdot A$ [2], т.е. в основе сравнения эффективности по смещению оценок показателей надежности лежит минимизация функционала вида $C(\theta(R,n)) = A\theta(R,n) \cdot D\theta(R,n)$ на предложенных оценках $\theta(R,n)$ при условии, что должно выполняться соотношение $D > 4A$.

Цель работы. Целью работы является получение эффективных оценок показателей надежности для биномиального плана испытаний и плана испытаний с ограниченным временем и восстановлением при использовании критерия эффективности смещенных оценок.

Заметим, что оценки показателей надежности, предлагаемые для сравнения в соответствии с критерием эффективности смещенных оценок, должны быть: строго монотонны по всем своим параметрам, для вероятности – строго больше нуля и строго меньше единицы, что соответствует случайной модели отказа изделий. Оценки, которые при $R = 0$ и любом объеме n реализуются константой $\theta(R,n) = \text{Const}$ (например, нулем или единицей) не соответствуют случайной модели отказа изделий и, как не имеющие физической интерпретации, вызывают большие сомнения в своей эффективности при нулевом исходе. В качестве предлагаемых оценок следует использовать составные оценки, состоящие из двух частей: первая часть соответствует $R = 0$, вторая часть – $R > 0$. Именно такие составные оценки, как правило, в своем классе доставляют функционалу $A(\theta)$ минимум [5, 6]. В качестве примера можно привести эффективную смещенную оценку средней наработки до отказа для плана с ограниченным временем испытаний и восстановлением отказавших изделий (NВτ), где $N = n$ – число испытуемых изделий, В – признак восстановления изделий, τ – время испытаний [1]: $\tilde{T}_0(R{=}0) = 2N\tau$, $\tilde{T}_0(R > 0) = N\tau/(R + 1)$ [5, 6]. Оценка $\tilde{T}_0$ в классе смещенных оценок вида $\tilde{\theta}(N,R,\tau) = N\tau/(R + 1) + N\tau f(R)$, где $f(R)$ – произвольная функция, которая доставляет функционалу $A(\theta)$ минимум $A(\tilde{T}_0) = 0{,}25$. А, следовательно, оценка $\tilde{T}_0$ в этом классе является эффективной. Дальнейшее улучшение свойств оценок эффективных в данном классе смещенных оценок приводит к расширению класса, например, $\hat{\theta}(N,R,\tau) = N\tau/(R + \beta(R))$ [2]. Легко доказать, что класс оценок $\hat{\theta}(N,R,\tau)$ шире класса $\tilde{\theta}(N,R,\tau)$ [2].

Биномиальный план испытаний. Средняя наработка до отказа

Будем считать, что наработка до отказа изделий подчиняется экспоненциальному закону распределения вероятностей (з. р.) с параметром T_0, где последний совпадает со средней наработкой до отказа (СНДО). Время испытаний каждого из $N = n$ изделий обозначим через τ. Здесь и далее ограничим объем испытаний $0 < n \le 10$, что для высоконадежных и сложных изделий является пределом затрат.

В основе сравнения эффективности смещенных оценок СНДО лежит минимизация функционала вида $C(\theta(R,n)) = A\theta(R,n) \cdot D\theta(R,n)$ на предложенных оценках $\theta(R,n)$ при условии, что должно выполняться соотношение $D > 4A$ [2], где

$$A\left(\theta(n;R)\right) = \frac{1}{3}\sum_{\tau=10^3}^{10^5}\frac{1}{10}\sum_{n=1}^{10}\int_0^{\infty}\frac{1}{t^2}\left\{E\theta(n;R,\tau) - t\right\}^2 dt$$

– функционал, основанный на суммировании нормированных квадратов относительных смещений математических ожиданий оценок $\theta(R,n)$ от параметра t экспоненциального з. р. (СНДО) для всех возможных значений N, τ, $T_0 = t$ [2],

$$D\left(\theta(n;R)\right) = \frac{1}{3}\sum_{\tau=10^3}^{10^5}\frac{1}{10}\sum_{n=1}^{10}\int_0^{\infty}\frac{1}{t^2}E\left\{\theta(n;R,\tau) - E\theta(n;R,\tau)\right\}^2 dt$$

– нормированная суммарная дисперсия.

Интегрирование ведется по всем возможным величинам параметра (СНДО) t из $[0;\infty]$. В [2] приведены оценки условно эффективные в классе смещенных оценок параметра СНДО :

$T_{20} = 400 + 0{,}015\cdot\tau - \tau\cdot 0{,}7/\text{Ln}(1 - (R + 0{,}4)/(n + 0{,}4))$;

$T_{60} = 400 + 0{,}015\cdot\tau - \tau\cdot 0{,}75/\text{Ln}(1 - v(R,n,\gamma = 0{,}62)$.

Однако применяя составные оценки, можно получить более эффективные смещенные оценки. С этой целью рассмотрим следующие составные оценки, а именно:

$T_\tau(R{=}0) = 400 + 0{,}015\cdot\tau - \tau\cdot 0{,}7/\text{Ln}(1 - ((R{=}0) + 0{,}3)/(n + 0{,}3))$,

$T_\tau(R{>}0) = 400 + 0{,}015\cdot\tau - \tau\cdot 0{,}8/\text{Ln}(1 - ((R{>}0) + 2)/(n + 2))$;

$T_{\tau 2}(R{=}0) = 400 + 0{,}6\tau - \tau\cdot 0{,}6/\text{Ln}(1 - ((R{=}0) + 0{,}3)/(n + 0{,}3))$,

$T_{\tau 2}(R{>}0) = 400 + 0{,}01\cdot\tau - \tau\cdot 0{,}2/\text{Ln}(1 - ((R{>}0) + 2)/(n + 2)) - \tau^2\cdot 2\cdot 10^{-4}/\text{Ln}(1 - ((R{>}0) + 2)/(n + 2))$.

Табл. 1. Результаты подстановки предложенных оценок СНДО в функционалы $A(\theta(n;R))$ и $D(\theta(n;R))$ для биномиального плана испытаний

Вид оценки параметра СНДО	A	D	D / A	$C = D\cdot A\cdot 10000$
Оценки параметра СНДО, предложенные для биномиального плана испытаний в [2]				
$T_{20} = 400 + 0{,}015\cdot\tau - \tau\cdot 0{,}7/\text{Ln}(1 - (R + 0{,}4)/(n + 0{,}4))$	4,62	7,06	1,52	32,61
$T_{60} = 400 + 0{,}015\cdot\tau - \tau\cdot 0{,}75/\text{Ln}(1 - v(R,n,\gamma = 0{,}62))$	4,85	5,47	1,12	26,52
Оценки, предлагаемые для биномиального плана испытаний в настоящей статье				
$T_\tau(R{=}0) = 400 + 0{,}015\cdot\tau - \tau\cdot 0{,}7/\text{Ln}(1 - ((R{=}0) + 0{,}3) / (n + 0{,}3))$, $T_\tau(R{>}0) = 400 + 0{,}015\cdot\tau - \tau\cdot 0{,}8/\text{Ln}(1 - ((R{>}0) + 2)/(n + 2))$	4,33	11,69	2,70	50,88
$T_{\tau 2}(R{=}0) = 400 + 0{,}6\tau - \tau\cdot 0{,}6/\text{Ln}(1 - ((R{=}0) + 0{,}3)/(n + 0{,}3))$, $T_{\tau 2}(R{>}0) = 400 + 0{,}01\cdot\tau - \tau\cdot 0{,}2/\text{Ln}(1 - ((R{>}0) + 2)/(n + 2)) - \tau^2\cdot 2\cdot 10^{-4}/\text{Ln}(1 - ((R{>}0) + 2)/(n + 2))$	2,43	72,46	29,86	176,0

В табл. 1 приведены результаты подстановки предложенных оценок СНДО в функционалы $A(\theta(n;R))$ и $D(\theta(n;R))$ для биномиального плана испытаний.

Здесь и далее вычисления функционалов $A(\theta(n;R))$ и $D(\theta(n;R))$ проводились с шагом $\partial t = 10^{k=3,\ldots,6}$. При построении таблиц использовался вариант вычисления характеристики $C = D \cdot A$, когда вычисление функционалов A и D осуществлялось для каждого значения параметров n и p с последующим их раздельным суммированием, и уже на основе полученных суммарных значений A и D вычислялась характеристика $C = D \cdot A$.

Из табл. 1 следует, что в соответствии с критерием эффективности смещенных оценок в качестве наиболее эффективной следует однозначно считать оценку $T_{\tau 2}$ с величиной характеристики $C = 176$, т.к. остальные оценки, обладающие меньшими величинами характеристики C, как не удовлетворяющие критерию отбора $D > 4A$ не могут рассматриваться в качестве эффективных оценок.

Биномиальный план испытаний. Вероятность безотказной работы

Здесь и далее воспользуемся результатами работ [2]. Обозначим через θ некоторую абстрактную оценку вероятности отказа в процессе испытаний n изделий. В основе сравнения эффективности смещенных оценок ВБР лежит минимизация функционала вида $C(\theta(R,n)) = A\theta(R,n) \cdot D\theta(R,n)$ на предложенных оценках $\theta(R,n)$ при условии, что должно выполняться соотношение $D > 4A$ [2], где

$A\left(\theta(n;R)\right) = \frac{1}{10}\sum_{n=1}^{10}\int_0^1 \left(E\theta(n;R) - p\right)^2 dp$ – суммарное смещение (в квадрате),

$D\left(\theta(n;R)\right) = \frac{1}{10}\sum_{n=1}^{10}\int_0^1 E\left(\theta(n;R) - E\theta(n;R)\right)^2 dp$ – суммарная дисперсия.

Заметим, что функция вероятности биномиального плана испытаний P_Σ монотонно убывает с ростом $w = p$ [4, 5], а следовательно уравнение $P_\Sigma\left(R = r\right) = \sum_{k=0}^{r} P_n\left(k, w\right) = \beta$, имеет единственное решение, где $P_n(k,p) = C_n^k p^k (1-p)^{n-k}$. Расчеты показывают, что оценке $w(\beta,n,R)$, минимизирующей функционал $A(\theta(n;R))$, соответствует вероятность $\beta = 0{,}81$ [2, 5]. Оценка $w(\beta = 0{,}81)$ для биномиального плана испытаний имеет смещение, которое можно уменьшить.

В [2] приведены оценки параметра p плана биномиальных испытаний:

$\hat{}w = w(\beta = 0{,}81;n,R) - 0{,}1 / ((R+1)n)$;

$\hat{}p_{20}(R = 0) = \hat{}w(\beta = 0{,}81;n)$, $\hat{}p_{20}(R > 0) = R / n$,

имеющие меньшее смещение в сравнении с оценкой w. Однако можно получить более эффективные смещенные оценки. С этой целью рассмотрим следующие составные оценки, а именно:

$\tilde{}w(\beta,R = 0) = w(\beta = 0{,}993;n,R)$,

$\tilde{}w(\beta,R > 0) = w(\beta = 0{,}75;n,R)$;

$\tilde{}p_{20}(R=0) = \tilde{}w(\beta,R = 0)$, $\tilde{}p_{20}(R > 0) = R / n$;

$\tilde{}v(\beta,R = 0) = w(\beta = 0{,}9999;n,R)$,

$\tilde{}v(\beta,R > 0) = w(\beta = 0{,}68;n,R)$;

$\tilde{}p_\tau(g = \tau;\ T_p(R,\tau,n)) = 1 - \mathrm{Exp}(-g = \tau / T_p)$,

где $g = \tau$ – время, за которое рассматривают вероятность, τ – время испытаний, $T_p(R = 0) = 60 \cdot n\tau$, $T_p(R > 0) = (n\tau - R\tau/2)/(R + 0{,}4)$.

В табл. 2 приведены результаты подстановки предложенных оценок вероятности отказа в функционалы $A(\theta(n;R))$ и $D(\theta(n;R))$ для биномиального плана испытаний. При построении предложенных оценок учитывалось, что их вторая часть близка $p_0 = (R > 0) / n$. Близость второй части предложенных составных оценок к классической, несмещенной и эффективной оценке $p_0 = R / n$ гарантирует их эффективность в классе смещенных оценок, что и отражено в табл. 2. Расчет проводился до третьей значащей цифры величины функционала $A(\theta(n;R))$. Здесь и далее вычисления функционалов $A(\theta(n;R))$ и $D(\theta(n;R))$ проводились с шагом $\partial p = 10^{-3}$. А вычисления неявно заданных оценок вида $w(\beta;n,R)$ проводились с точностью 10^{-4}. При вычислении функци-

Табл. 2. Результаты подстановки предложенных оценок вероятности отказа в функционалы $A(\theta(n;R))$ и $D(\theta(n;R))$ для биномиального плана испытаний

Вид оценки параметра p	A	D	D / A	$C = D \cdot A \cdot 10000$
Оценки параметра p, предложенные для биномиального плана испытаний в [2]				
$\hat{}w = w(\beta = 0{,}81;n,R) - 0{,}1 / ((R+1)n)$	0,00303	0,0427	14,23	1,293
$\hat{}p_{20}(R = 0) = \hat{}w$, $\hat{}p_{20}(R > 0) = R / n$	0,000355	0,0443	124,7	0,157
Оценки, предлагаемые для биномиального плана испытаний в настоящей статье				
$\tilde{}w(\beta,R = 0) = w(\beta = 0{,}993;n,R)$, $\tilde{}w(\beta,R > 0) = w(\beta = 0{,}75;n,R)$	0,000730	0,0480	65,6	0,35
$\tilde{}p_{20}(R=0) = \tilde{}w(\beta,R = 0)$, $\tilde{}p_{20}(R > 0) = R / n$	2×10^{-6}	0,0484	1×10^{4}	0,00097
$\tilde{}v(\beta,R=0) = w(\beta = 0{,}9999;n,R)$, $\tilde{}v(\beta,R>0) = w(\beta = 0{,}68;n,R)$	0,000159	0,0483	303,6	0,0768
$\tilde{}p_\tau(g = \tau;T_p(R,\tau,n)) = 1 - \mathrm{Exp}(-g = \tau / T_p)$, $T_p(R = 0) = 60 \cdot n\tau$, $T_p(R > 0) = (n\tau - R\tau/2)/(R + 0{,}4)$	0,00180	0,0407	22,63	0,732
$p_0 = n / R$ – классическая оценка (эффективная и несмещенная)	0	0,0488	∞	0

оналов $A(\tilde{p}_\tau)$ и $B(\tilde{p}_\tau)$ учитывалось дополнительно еще одно усреднение (суммирование) по времени ($g = \tau$), за которое рассматривают вероятность ($\tilde{p}_\tau(g = \tau; T_p(R,\tau,n))$) и одновременно проводят испытание.

Из таблицы 2 следует, что в соответствии с критерием эффективности смещенных оценок эффективной среди предложенных является составная оценка $\tilde{p}_{20}$ с минимальной величиной характеристики $C = 0{,}00097$. Несмещенную оценку $p_0 = R / n$, приведенную для сравнения, из рассмотрения в качестве эффективной исключаем, хотя именно она является эффективной, однако ее свойство (в случае $R = 0$ при любом $n > 0$) реализоваться нулем не соответствует случайной модели отказа изделий и она, как не имеющая физической интерпретации, вызывает большие сомнения в своей эффективности при нулевом исходе.

Заметим, что все предлагаемые оценки θ должны пройти проверку на строгую монотонность при любом объеме и количестве отказов (для вероятности отказа): $\theta(R+1, n) > \theta(R,n)$, $\theta(R, n+1) < \theta(R,n)$. В противном случае оценки, не прошедшие проверку на строгую монотонность, должны отвергаться, например, классическая оценка $p_0 = R / n$ в части событий «$R = 0$». Аналогично, оценка ВБР $1 - \tilde{v}(R = 0)$ в части событий «$R = 0$» при изменении n от 1 до 10 меняет свою величину от 0,9999 до 0,99999. Такое отличие величин ВБР (в пятом знаке после запятой в указанном диапазоне переменной n) для практики можно считать неразличимым, т.е. величину оценки ВБР $1 - \tilde{v}(R = 0)$ в части событий «$R = 0$» при изменении n от 1 до 10 с хорошим приближением можно считать постоянной и равной 0,9999, поэтому оценка $\tilde{v}(\beta,R,n)$ как и классическая оценка $p_0 = R / n$ должна быть отвергнута. Кроме того, для любого варианта составной оценки $\tilde{v}(\beta,R = 0,n) = w(\beta,R = 0,n)$ и $\tilde{v}(\beta,R > 0,n) = w(\beta = 0{,}68,R > 0,n)$, служащей для подстановки в функционалы $A(\tilde{v})$ и $D(\tilde{v})$, где β в первом члене варианта этой составной оценки при $R = 0$ варьируется от 0,9999 до 0,99999, величина функционала A (суммарного смещения) уменьшается на величину меньше чем 0,001%. Такое изменение функционала A можно считать несущественным, что подтверждает сделанные выводы.

*А*налогично – для составной оценки $\tilde{p}_\tau(g = \tau; T_p(R,\tau,n)) = 1 - \mathrm{Exp}(-(g = \tau) / T_p(R,n,\tau))$, где $T_p(R = 0) = xn\tau$, $T_p(R > 0) = (n\tau - R\tau/2)/(R + 0{,}4)$ – некоторый вариант составной оценки СНДО, служащий для подстановки в функционалы A и D, x – переменная в первом члене варианта этой составной оценки, изменяющаяся от 60 до 10000 при $R = 0$, величина функционала A (суммарного смещения) уменьшается на величину меньше 0,0001%. Поэтому в двух последних случаях $\tilde{v}$ и $\tilde{p}_\tau$ ограничились составными оценками, первый член которых имеет вид $\tilde{v}(\beta,R = 0,n)) = w(\beta = 0{,}9999,R = 0,n)$ и $\tilde{p}_\tau(g = \tau; T_p(R = 0) = 60n\tau)$, чье влияние на изменение величины функционала $A(\tilde{v}) = 0{,}000159$ или $A(\tilde{p}_\tau) = 0{,}00180$ ограничено третьей значащей цифрой, описывающей целесообразное для практики суммарное смещение.

Отметим одно свойство оценок ВБР биномиального плана испытаний, а именно: их величины при $R = 0$ близки к единице, например, при $n = 1$

$1 - \tilde{v}(\beta,R = 0,n = 1) = 1 - w(\beta = 0{,}9999,R = 0,n = 1) = 0{,}9999$,

$1 - \tilde{w}(\beta,R = 0,n = 1) = 1 - w(\beta = 0{,}993,R = 0,n = 1) = 0{,}993$,

$1 - \tilde{p}_\tau(g = \tau; T_p(R = 0,\tau = g,n = 1)) = \mathrm{Exp}(-\tau / 60(n = 1)\tau) = 0{,}983$,

$1 - \tilde{p}_\tau(g = \tau; T_p(R = 0,\tau = g,n = 1)) = \mathrm{Exp}(-\tau/ 1000(n = 1)\tau) \approx 1$ (оценка исключена из дальнейшего рассмотрения).

С ростом $n > 1$ величины предложенных оценок возрастают, стремясь к единице. Т.е. в этом факте эти оценки близки по своим свойствам к несмещенной оценке $p_0 = R / n$.

Заметим тот факт, что для эффективных смещенных оценок $\tilde{w}$ и $\tilde{p}_{20}$ не только величина суммарного смещения близка к нулю, но и величина их суммарной дисперсии (0,0480 и 0,0484) близка к суммарной дисперсии классической, эффективной и несмещенной оценки $p_0 = R / n$ (0,0488), что соответствует неравенству Крамера-Рао [3, 4].

В тех задачах, когда по результатам испытаний n изделий необходимо сделать прогноз величины ВБР за более или менее длительный период, чем время испытаний τ (в пределах 30% изменения от τ), то следует использовать оценку ВБР $P_g = 1 - \tilde{p}_\tau(g; T_p(R,\tau,n))$.

План испытаний типа NBτ. Вероятность безотказной работы

Здесь и далее обозначения плана испытаний соответствуют [1]. Для плана типа *N*Bτ достаточной статистикой является число наблюденных отказов (r) [3, 4]. Обозначим случайное число отказов через R, тогда для плана испытаний типа *N*Bτ случайная величина R (далее – с.в.) имеет пуассоновское распределение $L(r;\Delta)$ с параметром $\Delta = n\tau / T_0$, $n = N$ [1, 4]. Тогда, по определению, r – реализация с.в. R. С другой стороны, R – сумма с.в. X_i, каждая из которых есть случайное число отказов одного из N изделий ($1 < i < n$), поставленных на испытания. С.в. X_i имеют пуассоновское распределение с параметром Δ / n:

$$L(r;\Delta) = \sum_{k=0}^{X_1+\ldots+X_n=r} \exp\{-\Delta\} \cdot \frac{\Delta^k}{k!}. \qquad (3)$$

Воспользуемся формулой (3) и изучим свойства оценки параметра Δ, получаемой из уравнения:

$$L(r;\Delta) = \sum_{k=0}^{r} \exp\{-\Delta\} \cdot \frac{\Delta^k}{k!} = \alpha \text{ или}$$

$$\varepsilon(\Delta) = \ln(2) + \ln\left(\sum_{k=0}^{r} \frac{\Delta^k}{k!}\right) - \Delta. \qquad (4)$$

Минимизируя абсолютную величину ε(Δ) в формуле (4) с необходимой точностью, получим искомую точечную оценку параметра Пуассона $\Delta = \Delta(R,\alpha)$. Имея оценку $\Delta(R,\alpha)$, легко получить оценку СНДО $T_5 = n\tau / \Delta(R,\alpha)$.

Введем обозначение $m = n\tau$. Рассмотрим оценки ВБР за временной отрезок g вида $\theta(m,g;R) = \exp\{-g / T_i\}$, где T_i – некоторая оценка СНДО.

В основе сравнения эффективности смещенных оценок ВБР лежит минимизация функционала вида

Табл. 3. Результаты подстановки предложенных оценок ВБР в функционалы $A(\theta(m,g;R))$, $D(\theta(m,g;R))$ для плана испытаний типа NBτ

Вид оценки ВБР	A	D	D / A	$C=D\cdot A\cdot 1000$
Оценки, предложенные для плана испытаний типа NBτ в [2, 5]				
$P_9(T_9) = e^{-g/T_9}$, где $T_9(R = 0) = 4n\tau / \Delta(R,\alpha = 0{,}5)$, $T_9(R > 0) = n\tau / \Delta(R,\alpha=0{,}5)$	0,01251	0,15496	12,38	1,93
$P_4(T_4) = e^{-g/T_4}$, где $T_4(R = 0) = 6n\tau$, $T_4(R > 0) = n\tau / (R + 0{,}5)$	0,01200	0,15665	13,05	1,87
Оценка, предлагаемая для плана испытаний типа NBτ в настоящей статье				
$P_v(T_v(R)) = e^{-g/T_v(R)}$, где $T_v(R = 0) = 5{,}2n\tau$, $T_v(R > 0) = n\tau / (R + 0{,}5)$	0,01180	0,15105	12,80	1,78

Табл. 4. Результаты расчета ВБР примера 1 ($\tau = g$, $R = 0$)

$N = n$	$\tilde{p}_\tau(g = \tau;T_p(R = 0,\tau,n)) = 1-\mathrm{Exp}(-g = \tau / T_p)$, где $T_p(R = 0) = 60n\tau$	$1 - \tilde{p}_{20}(R = 0) = 1 - \tilde{w}(\beta = 0{,}993; R = 0)$	$P_v(T_v) = \exp\{-g / 5{,}2n\tau\}$, $g = \tau$, $R = 0$
	Биномиальный план испытаний		План испытаний типа NBτ
1	0,9834	0,9930	0,8251
2	0,9917	0,9950	0,9083
3	0,9944	0,9966	0,9379
4	0,9958	0,9975	0,9531
5	0,9966	0,9980	0,9623
6	0,9972	0,9983	0,9685
7	0,9976	0,9986	0,9729
8	0,9979	0,9987	0,9762
9	0,9981	0,9988	0,9789
10	0,9983	0,9990	0,9810

$C(\theta(R,n)) = A\theta(R,n) \bullet D\theta(R,n)$ на предложенных оценках $\theta(R,n)$ при условии, что должно выполняться соотношение $D > 4A$ [2], где

$$A(\theta)=\frac{1}{3}\sum_{m=10^3}^{10^5}\frac{1}{10}\sum_{g=10^3}^{10^5}\int_0^\infty\frac{1}{t^2}\left\{E\theta(n;R,m,g)-\exp(-g\Delta/m)\right\}^2 d\Delta$$

– суммарное нормированное смещение (в квадрате),

$$D(\theta)=\frac{1}{3}\sum_{m=10^3}^{10^5}\frac{1}{10}\sum_{g=10^3}^{10^5}\int_0^\infty\frac{1}{t^2}E\left\{\theta(n;R,m,g)-E\theta(n;R,m,g)\right\}^2 d\Delta$$

– суммарная нормированная дисперсия.

В [2] приведены эффективные смещенные оценки ВБР для плана испытаний с ограниченным временем и восстановлением (NBτ):

$P_9(T_9) = e^{-g/T_9}$, где $T_9(R = 0) = 4n\tau / \Delta(R,\alpha = 0{,}5)$, $T_9(R > 0) = n\tau / \Delta(R,\alpha = 0{,}5)$ [2, 5];

$P_4(T_4) = e^{-g/T_4}$, где $T_4(R = 0) = 6n\tau$, $T_4(R > 0) = n\tau / (R + 0{,}5)$ [2, 5].

Представленные эффективные оценки все же обладают достаточно большим смещением, которое можно значительно уменьшить. С этой целью рассмотрим следующую составную оценку:

$$P_v(T_v(R)) = e^{-g/T_v(R)},$$

где $T_v(R = 0) = 5{,}2n\tau$, $T_v(R > 0) = n\tau / (R + 0{,}5)$.

В табл. 3 приведены результаты подстановки предложенных оценок ВБР в функционалы $A(\theta(m,g;R))$, $D(\theta(m,g;R))$ для плана испытаний типа NBτ. При вычислениях функционалов $A(\theta(m,g;R))$, $D(\theta(m,g;R))$ диапазон суммирования по времени и объеме испытаний был несколько изменен в сравнении с предыдущим материалом [2], поэтому величины результатов изменились, что не отразилось на сути вещей.

Из табл. 3 следует, что в соответствии с критерием эффективности смещенных оценок в качестве наиболее эффективной следует однозначно считать оценку $P_v(T_v)$ с минимальной величиной характеристики $C = 1{,}78$.

Пример 1. В процессе испытаний на надежность ряда из 1, 2, …, 10 изделий отказы не возникали. Требуется дать оценку ВБР контролируемой партии изделий, используя эффективные смещенные оценки для биномиального плана испытаний и плана испытаний с восстановлением и ограниченным временем испытаний. Время испытаний и время, за которое оценивается ВБР, равны $\tau = g$. Результаты расчета приведены в табл. 4.

Из примера 1 следует, что для биномиального плана и плана испытаний с восстановлением и ограниченным временем испытаний в рамках примера 1 результаты эффективных смещенных оценок $1 - \tilde{p}_{20}$ и $P_v(T_v)$ различаются. Выбор, какие оценки следует использовать, остается за испытателем.

Пример 2. В рамках примера 1 возник один отказ. Требуется дать оценку ВБР контролируемой партии изделий, используя эффективные смещенные оценки для биномиального плана испытаний и плана испытаний с восстановлением и ограниченным временем испытаний. Время испытаний и время, за которое оценивается ВБР, равны $\tau = g$. Результаты расчета приведены в табл. 5.

Табл. 5. Результаты расчета ВБР примера 2 ($\tau = g$, $R = 1$)

$N = n$	$1-\tilde{p}_\tau(g=\tau;T_p(R=1))=\mathrm{Exp}(-g=\tau/T_p)$, где $T_p(R=1)=(n\tau-(R=1)\tau/2)/1{,}4$	$1-\tilde{w}(\beta=0{,}75;R=1)$	$1-\tilde{p}_{20}(R=1)=1-(R=1)/n$	$P_v(T_v)=\exp\{-g(R+0{,}5)/n\tau\}$, $g=\tau$, $R=1$
	Биномиальный план испытаний			План испытаний типа NBτ
1	0,061	0,000	0,000	0,223
2	0,393	0,500	0,500	0,472
3	0,571	0,673	0,666	0,606
4	0,670	0,756	0,750	0,687
5	0,733	0,806	0,800	0,740
6	0,775	0,839	0,833	0,779
7	0,806	0,862	0,857	0,807
8	0,830	0,879	0,875	0,829
9	0,848	0,893	0,888	0,846
10	0,863	0,903	0,900	0,860

Табл. 6. Результаты подстановки предложенных оценок СНДО в функционалы $A(\theta(n,R))$, $D(\theta(n,R))$ для плана испытаний типа NBτ

Вид оценки СНДО	A	D	D/A	$C=D\cdot A\cdot 1000$
Оценка, предложенная для плана испытаний типа NBτ в [2]				
$T_{11}=2{,}2n\tau$, при $R=0$ и $T_{11}=n\tau/(R+1+1/R)$, при $R>0$	0,214	3,93	18,36	0,841
Оценка, предлагаемая для плана испытаний типа NBτ в настоящей статье				
$T_{\text{В}}=2{,}4n\tau+0{,}24\tau$, при $R=0$ и $T_{\text{В}}=n\tau/(R+0{,}8+1{,}8/R)$, при $R>0$	0,200	3,83	19,14	0,767
$T_{\text{В}2}=2{,}5n\tau+0{,}1\tau$, при $R=0$, $T_{\text{В}2}=n\tau/(R+0{,}9+7{,}5e^{-R})$, при $R>0$	0,188	3,92	20,85	0,736

План испытаний типа *NB*τ. СНДО

В основе сравнения эффективности смещенных оценок СНДО лежит минимизация функционала вида $C(\theta(R,n)) = A\theta(R,n) \bullet D\theta(R,n)$ на предложенных оценках $\theta(R,n)$ при условии, что должно выполняться соотношение $D > 4A$ [2], где

$A\left(\theta(n;R)\right)=\int_0^\infty \frac{1}{t^2}\left\{E\theta(n;R)-t\right\}^2 d\Delta$ – суммарное нормированное смещение (в квадрате),

$D\left(\theta(n;R)\right)=\int_0^\infty \frac{1}{t^2}E\left\{\theta(n;R)-E\theta(n;R)\right\}^2 d\Delta$ – суммарная нормированная дисперсия.

В [2] приведена эффективная смещенная оценка СНДО для плана испытаний с ограниченным временем и восстановлением (NBτ)

$T_{11}=2{,}2n\tau$, при $R=0$ и $T_{11}=n\tau/(R+1+1/R)$, при $R>0$.

Представленная эффективная смещенная оценка все же обладает достаточно большим смещением, которое можно значительно уменьшить. С этой целью рассмотрим следующие составные оценки:

$T_{\text{В}}=2{,}4n\tau+0{,}24\tau$, при $R=0$ и $T_{\text{В}}=n\tau/(R+0{,}8+1{,}8/R)$, при $R>0$;

$T_{\text{В}2}=2{,}5n\tau+0{,}1\tau$, при $R=0$ и $T_{\text{В}2}=n\tau/(R+0{,}9+7{,}5e^{-R})$, при $R>0$.

В табл. 6 приведены результаты подстановки предложенных оценок СНДО в функционалы $A(\theta(n,R))$, $D(\theta(n,R))$ для плана испытаний типа NBτ.

Из табл. 6 следует, что в соответствии с критерием эффективности смещенных оценок в качестве наиболее эффективной следует однозначно считать оценку $T_{\text{В}2}$ с минимальной величиной характеристики $C = 0{,}736$.

Пример 3. В процессе испытаний на надежность ряда из 1, 2, …, 10 изделий отказы не возникали. Требуется дать оценку СНДО контролируемой партии изделий, используя эффективные смещенные оценки для биномиального плана испытаний и плана испытаний с восстановлением и ограниченным временем испытаний. Время испытаний равно τ = 1000 ч. Результаты расчета приведены в табл. 7.

Из примера 3 следует, что для биномиального плана и плана испытаний с восстановлением и ограниченным временем испытаний в рамках примера 3 результаты эффективных смещенных оценок $T_{\tau 2}$ и $T_{\text{В}2}$ различаются. Выбор, какие оценки следует использовать, остается за испытателем.

Табл. 7. Результаты расчета СНДО примера 3 (τ = 1000 ч, R = 0)

$N = n$	$T_{\tau 2}(R=0)=400+0{,}6\tau-\tau\cdot 0{,}6/\mathrm{Ln}(1-((R=0)+0{,}3)/(n+0{,}3))$	$T_{\text{В}2}=2{,}5n\tau+0{,}1\tau$, при $R=0$
	Биномиальный план испытаний	План испытаний типа NBτ
1	3287	2600
2	5293	5100
3	7295	7600
4	9296	10100
5	11297	12600
6	13298	15100
7	15298	17600
8	17298	20100
9	19298	22600
10	21299	25100

Пример 4. В рамках примера 3 возник один отказ. Требуется дать оценку СНДО контролируемой партии изделий, используя эффективные смещенные оценки для биномиального плана испытаний и плана испытаний с восстановлением и ограниченным временем испытаний. Результаты расчета приведены в табл. 8.

Табл. 8. Результаты расчета СНДО примера 4 (τ = 1000 ч, R = 1)

$N = n$	$T_{\tau 2}(R > 0) = 400 + 0{,}01\cdot\tau - \tau\cdot 0{,}2/\mathrm{Ln}(1 - ((R>0) + 2)/(n + 2)) - \tau^2\cdot 2\cdot 10^{-4}/\mathrm{Ln}(1 - ((R>0) + 2)/(n + 2))$	$T_{B2} = n\tau / /(R + 0{,}9 + 7{,}5e^{-R})$, при $R = 1$
	Биномиальный план испытаний	План испытаний типа NBτ
1	424	215
2	699	429
3	847	644
4	987	859
5	1125	1073
6	1261	1288
7	1397	1502
8	1531	1717
9	1666	1932
10	1800	2146

Послесловие

Новые знания определяют развитие в начале использования и сдерживают его в конце. Чтобы определять развитие, следует отказаться от старых догм и приобрести новые.

Выводы

Получены эффективные смещенные оценки различных показателей надежности для биномиального плана испытаний и плана с ограниченным временем испытаний и восстановлением отказавших изделий. Полученные оценки показателей надежности имеют направленность практического применения при испытаниях и эксплуатации однородной продукции различного назначения, в процессе которых отказы не возникали.

Библиографический список

1. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности: Основные характеристики надежности и их статистический анализ. Изд.2-е, испр. и доп. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. 584 с.

2. Михайлов В.С. Критерий эффективности смещенных оценок. Новый взгляд на старые проблемы // Надежность. 2022. № 1. С. 30-37.

3. Ясногородский Р.М. Теория вероятностей и математическая статистика: Учебное пособие. Санкт-Петербург: Наукоемкие технологии, 2019. 320 с.

4. Шуленин В.П. Математическая статистика. Часть 1. Параметрическая статистика. Томск: Издательство НТЛ, 2012. 540 с.

5. Михайлов В.С., Юрков Н.К. Интегральные оценки в теории надежности. Введение и основные результаты. Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2020. 149 с.

6. Михайлов В.С. Нахождение эффективной оценки средней наработки на отказ // Надежность. 2016. № 4. С. 40-42.

References

1. Gnedenko B.V., Beliaev Yu.K., Soloviev A.D. [Mathematical methods in the dependability theory. Primary dependability characteristics and their statistical analysis: Second edition, corrected and extended]. Moscow: Knizhny dom LIBROKOM; 2013. (in Russ.)

2. Mikhailov V.S. Efficiency criterion of biased estimates. A new take on old problems. *Dependability* 2022;1:30-37.

3. Yasnogorodsky R.M. [Probability theory and mathematical statistics. Textbook]. Saint Petersburg: Naukoyomkiye tekhnologii; 2019. (in Russ.)

4. Shulenin V.P. [Mathematical statistics. Part 1. Parametric statistics]. Tomsk: Izdatelstvo NTL; 2012. (in Russ.)

5. Mikhailov V.S., Yurkov N.K. [Integral estimation in the dependability theory. Introduction and main findings]. Moscow: TEKHNOSFERA; 2020. (in Russ.)

6. Mikhailov V.S. Efficient estimation of mean time to failure. *Dependability* 2016;4:40-42.

Сведения об авторе

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

About the author

Viktor S. Mikhailov, Lead Engineer, D.I. Mendeleev Central Research and Design Institute of Chemistry and Mechanics (FGUP CNIIHM). Address: 16a Nagatinskaya St., Moscow, 115487, Russian Federation, e-mail: Mvs1956@list.ru.

Вклад автора в статью

Получены эффективные по смещению оценки вероятности безотказной работы для биномиального плана испытаний и плана испытаний с ограниченным временем и восстановлением.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Об использовании методов Big Data в области обеспечения функциональной безопасности

Big Data-based methods for functional safety case preparation

Ефим Н. Розенберг[1], Алексей М. Ольшанский[1]*, Алексей В. Озеров[1], Роман А. Сафронов[1]
Efim N. Rozenberg[1], Alexey M. Olshansky[1], Alexey V. Ozerov[1], Roman A. Safronov[1]
[1]Акционерное общество «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте» (АО «НИИАС»), Москва, Российская Федерация
[1]Joint Stock Company Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation (JSC NIIAS), Moscow, Russian Federation
**a.olshansky@vniias.ru*

Ефим Н. Розенберг

Алексей М. Ольшанский

Алексей В. Озеров

Роман А. Сафронов

Резюме. Цель. *Целью статьи является обзор возможностей, подходов и приемов Big Data в области исследования и обеспечения функциональной безопасности транспортных систем, в том числе беспилотных систем. Отмечается, что современные технологии, приводящие к созданию транспортных систем нового поколения, эксплуатирующихся в изменчивых условиях и при значительном уровне пассажиронапряженности, требуют изменений в сложившихся схемах построения систем управления. В условиях роста агломераций многие пригородные системы сливаются с городскими, а интервалы движения в них приближаются по своей величине к интервалам движения в метрополитене. В этих условиях происходит переход от человеко-машинных систем к системам автоматическим, характеризующимся различной степенью автоматизации. Наблюдается масштабное внедрение цифровых средств связи, автоматизации технологических операций и дистанционного сбора данных и механизмов управления в сфере железнодорожных перевозок. Изменение поведения транспортных систем как подвида киберфизических систем приводит к смене парадигмы управления с линейно-функциональной к адаптивной с принципиально нелинейными системами с переменной структурой и переменными параметрами.* **Методы.** *Традиционно для систем управления устойчивость оценивается по Ляпунову, в этом случае поведение устойчивой системы со 100% вероятностью можно представить в окрестности -трубки. Для рассматриваемых контролируемых систем, в которых устойчивость появляется за счет введения алгоритма-супервайзера, говорить о строгой устойчивости по Ляпунову некорректно. Идея контролируемых алгоритмов может распространяться не только на ИНС, но и на другие интеллектуальные алгоритмы. При этом выделяется область систем и знаний, не охваченная современными нормативными документами и методами доказательства безопасности. Выявление и исключение аномальных сигналов таких систем в этом случае позволят уточнить границы множества допустимых процессов, увеличив в ряде случаев быстродействие алгоритмов принятия решений за счет отключения целой ветви неблагоприятных сценариев.* **Результаты.** *Для нелинейных транспортных систем с переменной структурой и переменными параметрами рассмотрены примеры использования машинного обучения/больших данных (ML/Big Data) в анализе функциональной безопасности сложных систем управления на железнодорожном транспорте. Предложена конструкция применения контролируемых искусственных нейронных сетей во взаимодействии с принципами верификации кода (model checking). Особое внимание уделено искусственным нейронным сетями с элементами управления, которые рассматриваются в качестве нового подкласса нейронных сетей.* **Заключение.** *Сформированы современные требования к транспортным системам с применением искусственного интеллекта для адаптивного графика движения поездов и беспилотных систем управления. Это позволит в дальнейшем развивать целое направление исследований, связанное с функционированием сложных систем с контринтуитивным поведением – от оценки уровня функциональной безопасности систем с применением ИИ и машинного обучения до доказательства безопасности интеллектуальных контролируемых систем управления на основе методов формальной верификации.*

Abstract. Aim. *The paper aims to overview the opportunities, approaches and techniques of studying and ensuring functional safety of transportation systems, including those driverless, with the use of Big Data. It is noted, that the modern technology that underpins next-generation transportation systems that operate in ever-evolving conditions, with significant numbers of passengers, requires modified control systems design. With the growth of agglomerations, many suburban systems merge with urban ones, and their traffic intervals are close in size to those of the metro. Under these conditions, there is a transition from human-machine*

systems to automatic systems, characterized by varying degrees of automation. Widespread deployment of digital telecommunications, process automation and remote data collection and management technology is under way in railway transportation. Variations in the behaviour of transportation systems as a type of cyberphysical system cause a paradigm shift from line-and-staff to adaptive management with fundamentally non-linear systems with variable structure and parameters. **Methods.** *Control and management systems are conventionally assessed for Lyapunov's stability. In this case, the behaviour of a stable system can with a 100% probability be predicted in the neighbourhood of the -tube. For the examined supervised systems, in which stability is ensured through the introduction of a supervisor algorithm, speaking of a strict Lyapunov's stability would not be correct. The idea of controlled algorithms can extend not only to ANN, but also to other intelligent algorithms. Thus, a scope of systems and knowledge is identified that is not covered by the relevant regulatory documents and methods of safety case preparation. Identifying and eliminating abnormal signals of such systems would allow defining the boundaries of the set of acceptable processes more clearly, thus, in some cases, increasing the speed of the decision algorithms by disabling an entire branch of unfavourable scenarios.* **Results.** *For non-linear transportation systems with variable stricture and parameters, examples are considered of machine learning/Big Data application in analysing the functional safety of complex control/management systems in railway transportation. The paper proposes the concept of application of supervised artificial neural networks combined with model checking. A special attention is given to artificial neural networks with control elements that are considered as a new subclass of neural networks.* **Conclusion.** *Updated requirements are defined for transportation systems using artificial intelligence as part of adaptive train schedule management and autonomous train control. That will ultimately allow developing an entire line of research associated with the operation of complex systems with counterintuitive behaviour from AI-based system functional safety estimation and machine learning to safety case preparation of intelligent supervised control/management systems based on formal verification.*

Ключевые слова: *функциональная безопасность, доказательство безопасности, верификация кода, контролируемые искусственные нейронные сети (К-ИНС), машинное обучение, большие данные, беспилотные системы управления, график движения поездов (ГДП), марковские цепи.*
Keywords: *functional safety, safety case, code verification, supervised artificial neural networks (SANN), machine learning, Big Data, driverless control systems, train schedule, Markov chains.*

Для цитирования: *Розенберг Е.Н., Ольшанский А.М., Озеров А.В., Сафронов Р.А. Об использовании методов Big Data в области обеспечения функциональной безопасности // Надежность. 2022. №2. С. 38-46. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-38-46*
For citation: *Rozenberg E.N., Olshansky A.M., Ozerov A.V., Safronov R.A. Big Data-based methods for functional safety case preparation. Dependability 2022;2:38-46. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-38-46*

Поступила *08.02.2022 г.* / **После доработки** *23.03.2022 г.* / **К печати** *17.06.2022 г.*
Received on: *08.02.2022* / **Revised on:** *23.03.2022* / **For printing:** *17.06.2022.*

Введение

Современные технологии, приводящие к созданию транспортных систем нового поколения, эксплуатирующихся в изменчивых условиях и при значительном уровне пассажиронапряженности, требуют изменений в сложившихся схемах построения систем управления. В условиях роста агломераций многие пригородные системы сливаются с городскими, а интервалы движения в них приближаются по своей величине к интервалам движения в метрополитене. В этих условиях происходит переход от человеко-машинных систем к системам автоматическим, характеризующимся различной степенью автоматизации (от GoA1 до GoA4). Отказы и задержки, случающиеся в таких транспортных системах, приводят к существенным транспортным сбоям, затрагивающим интересы тысяч пассажиров и требующим мобилизации инфраструктурных и технических ресурсов. Для указанных сценариев эксплуатации транспортных систем становится невозможным применять традиционные подходы к перестроению расписаний дивжения и к построению планов транспортного обслуживания с помощью алгоритмов оптимизации статических задач (что в долгосрочном планировании, вне сомнения, может вполне применяться).

Для парирования указанных вызовов требуется решить следующие первоочередные задачи:

1. Повышение степени адаптивности планирования и управления, в частности, в составлении и перестроении расписания;

2. Повышение устойчивости транспортной системы и ее технической составляющей к небезопасному поведению, отказам и возмущающим воздействиям.

Существенное удорожание как стоимости одного часа времени и инфраструктурного ресурса для компаний, так и собственно поездов и инфраструктурных устройств приводит к переходу на компьютерное моделирование и формальный анализ всех возможных ситуаций в транспортной системе, выполнить который возможно при помощи применения современных подходов и методов выработки адаптивного и функционально безопасного управления. Для решения указанных задач традиционные методы [1, 2 и др.] имеют весьма ограниченные возможности.

Определение области исследования

Опираясь на нормы стандартизации, следует рассмотреть такое понятие, как «зонтичный стандарт» (umbrella standard), т.е. основополагающий стандарт верхнего уровня. Для функциональной безопасности таковым является МЭК 61508 «Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью». МЭК/ГОСТ 61508 – это базовый стандарт функциональной безопасности, применимый ко всем отраслям промышленности.

Согласно положениям МЭК 61508, для обеспечения функциональной безопасности требуется сначала определить функции безопасности (safety functions), необходимые для снижения риска управляемого оборудования, а также для достижения и сохранения этим оборудованием безопасного состояния (например, функции противоаварийной защиты). Очень важно, что, согласно стандарту, система управления должна обладать свойством так называемой полноты обеспечения безопасности (safety integrity), под которым МЭК 61508 подразумевает вероятность того, что система будет корректно выполнять функции безопасности при всех заданных условиях в течение заданного интервала времени.

Помимо МЭК 61508 на практике используются более узкие стандарты функциональной безопасности для конкретных сфер. Так, например, в области железнодорожного транспорта имеется ГОСТ 33433-2015 «Управление рисками на железнодорожном транспорте», который устанавливает подход и общие правила управления рисками на железнодорожном транспорте, связанными с функциональной безопасностью объектов инфраструктуры и подвижного состава. Кроме того, применяется ГОСТ 33432-2015 «Политика, программа обеспечения безопасности. Доказательство безопасности объектов железнодорожного транспорта», который определяет назначение документов «Политика обеспечения безопасности», «Программа обеспечения безопасности» и «Доказательство безопасности», а также устанавливает основные требования к структуре и содержанию этих документов и порядок их разработки.

Выделяют следующие основные способы доказательства функциональной безопасности [3]:

• экспертный – на основе экспертизы технической и конструкторской документации;

• расчетный – на основе аналитических расчетов;

• имитационный – эксперименты с машинными моделями;

• экспериментальный испытательный – экспериментальные испытания с опытной системой (лабораторные испытания);

• натурный испытательный – испытания системы в полевых условиях на стадии пусконаладочных работ и периода приработки системы, сертификационные испытания;

• информационный – сбор статистических данных об отказах в процессе длительной эксплуатации одной системы или некоторого числа однотипных систем.

Выбор конкретного способа или нескольких зависит от квалификации разработчика и используемой им нормативной базы.

Особенности функционирования железнодорожного транспорта в современных условиях

Следует выделить несколько основных особенностей железнодорожного транспорта на пространстве 1520 на современном этапе.

Для железнодорожного транспорта характерна концентрация грузовых перевозок на отдельных направлениях железнодорожной сети. Основная нагрузка приходится примерно на 10-процентную протяженность ее эксплуатационной длины. Исторически в Российской Федерации примерно половина всего грузооборота выполняется 1/6 частью железных дорог. Аналогичная ситуация имеется и в сфере пассажирских перевозок.

В связи с данной неравномерностью эксплуатации сети железных дорог, определенные ее части становятся крайне загруженными, что в итоге сказывается на работе всей сети. Основной причиной наличия данных «узких мест» является недостаточная пропускная способность полигонов. Причиной появления участков с заполнением пропускной способности выше допустимого уровня является также недостаточная мощность устройств тягового электроснабжения и длина приемоотправочных, сортировочных и вытяжных путей на промежуточных, участковых и сортировочных станциях. Это снижает пропускную и перерабатывающую способность станций, приводит к задержкам поездов у входных сигналов, в целом снижает участковую скорость пассажирских и грузовых поездов.

Для повышения пропускной и провозной способности направлений с учетом реально существующих ограничений на практике применяется комплексный подход, требующий значительного объема инвестиций. Сюда входят строительство главных путей, станционное развитие, поставка современных локомотивов, электрификация, усиление устройств тягового электроснабжения, модернизация СЦБ и связи (например, внедрение подвижных блок-участков). Вместе с тем, совершенствование технологии управления перевозками позволяет сократить капитальные затраты при применении конкретно ориентированных на объекты внедрения локальных решений.

В связи с этим, для повышения пропускной и провозной способности в краткосрочном периоде до завершения реализации крупных инфраструктурных проектов и для выполнения показателей программы развития целесообразно применять точечные технологические решения.

Например, в последнее десятилетие наблюдается масштабное внедрение цифровых средств связи, автоматизации технологических операций и дистанционного сбора данных и механизмов управления в сфере железнодорожных перевозок. Управление железнодорожными операциями благодаря использованию датчиков и микроконтроллеров, программируемых и дистанционно управляемых железнодорожных сигналов, и стрелочных переводов привело к повышению эффективности системы, а также операционной гибкости. Вместе с тем, сетевое подключение сделало железнодорожные сети передачи данных уязвимыми для кибератак. В настоящее время железнодорожные сети передачи данных все больше представляют собой киберфизическую систему с взаимосвязанными физическими, вычислительными и коммуникационными компонентами. Кибератаки на эти системы потенциально могут каскадироваться через эти взаимосвязи и приводить к значительному ущербу. Эти системы имеют решающее значение для безопасности из-за их масштабных финансовых последствий и, что более важно, угроз для человеческой жизни. Поэтому необходимо учитывать требования к безопасности и отказоустойчивости данных систем в самом начале их проектирования [4].

Таким образом, для ускорения внедрения новых технологий необходимы новые подходы для доказательства и обеспечения их безопасности. В первую очередь это создание вариантных и нормативных графиков для больших полигонов и станций и особенно с перспективой масштабного применения беспилотных транспортных средств в пассажирских перевозках и в маневровой работе. Все эти новые технические средства из-за сложной их реализации требуют применения интеллектуальных элементов управления. Одним из решений может послужить использование технологий искусственного интеллекта, глубинных нейронных сетей в сочетании с обработкой больших данных в качестве более современного расчетного способа доказательства функциональной безопасности.

Технологии доказательства функциональной безопасности систем с искусственным интеллектом с помощью инструмента больших данных

Одним из сложных вопросов в доказательстве безопасности является определение аномальных сценариев, которые могут потенциально привести к конкретной аварии. На этом сложном этапе оценки безопасности эксперты должны уметь, в том числе, понимать особенности технологий искусственного интеллекта.

Так, например, в работе [5] была предложена модель просчета опасных сценариев работы автоматических железнодорожных устройств с использованием программной среды ACASYA. Программные инструменты, описанные в данной работе, преследуют две основные цели: во-первых, запись и хранение опыта, связанного с анализом безопасности, и, во-вторых, помощь тем, кто участвует в разработке и оценке систем, в решении сложной задачи оценки безопасности. В настоящее время эти инструменты находятся на стадии макета, однако по итогам проверки экспертами по безопасности была отмечена перспективность предложенных подходов.

Выбранный в данной работе подход основан на нескольких возможностях искусственного интеллекта и, в частности, на использовании следующих методов:

• аккумулирование информации о безопасности на железной дороге и, в частности, о сценариях потенциальных аварий;

• обучение путем классификации понятий для группировки сценариев аварий в однородные классы, например, относящиеся к проблемам столкновения поездов или схода с рельсов;

• машинное обучение на основе правил (Rule-based machine learning, RBML) для автоматического определения на основе базы исторических сценариев (обратная

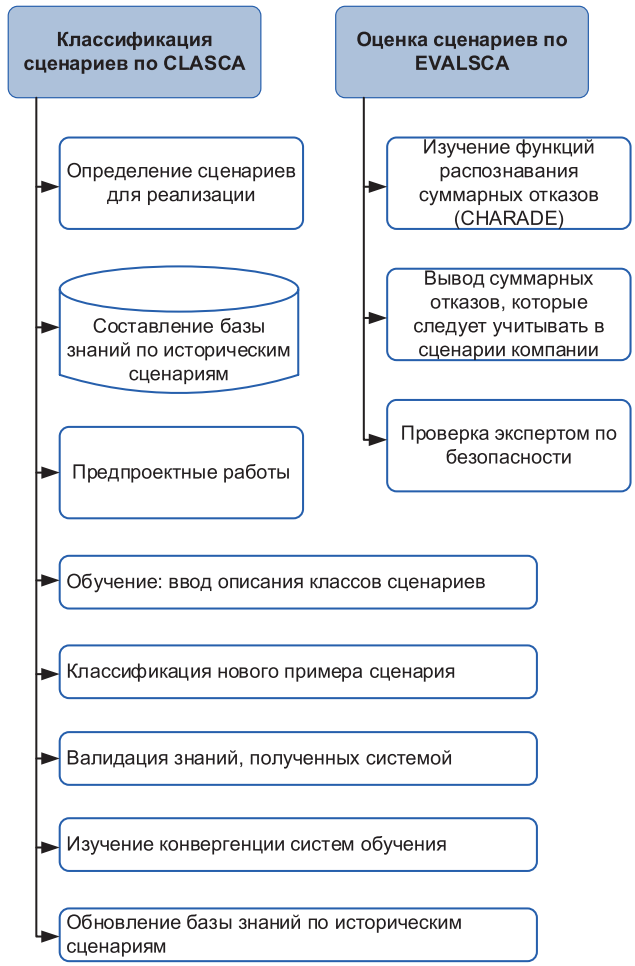


Рис. 1 Методология анализа и оценки безопасности

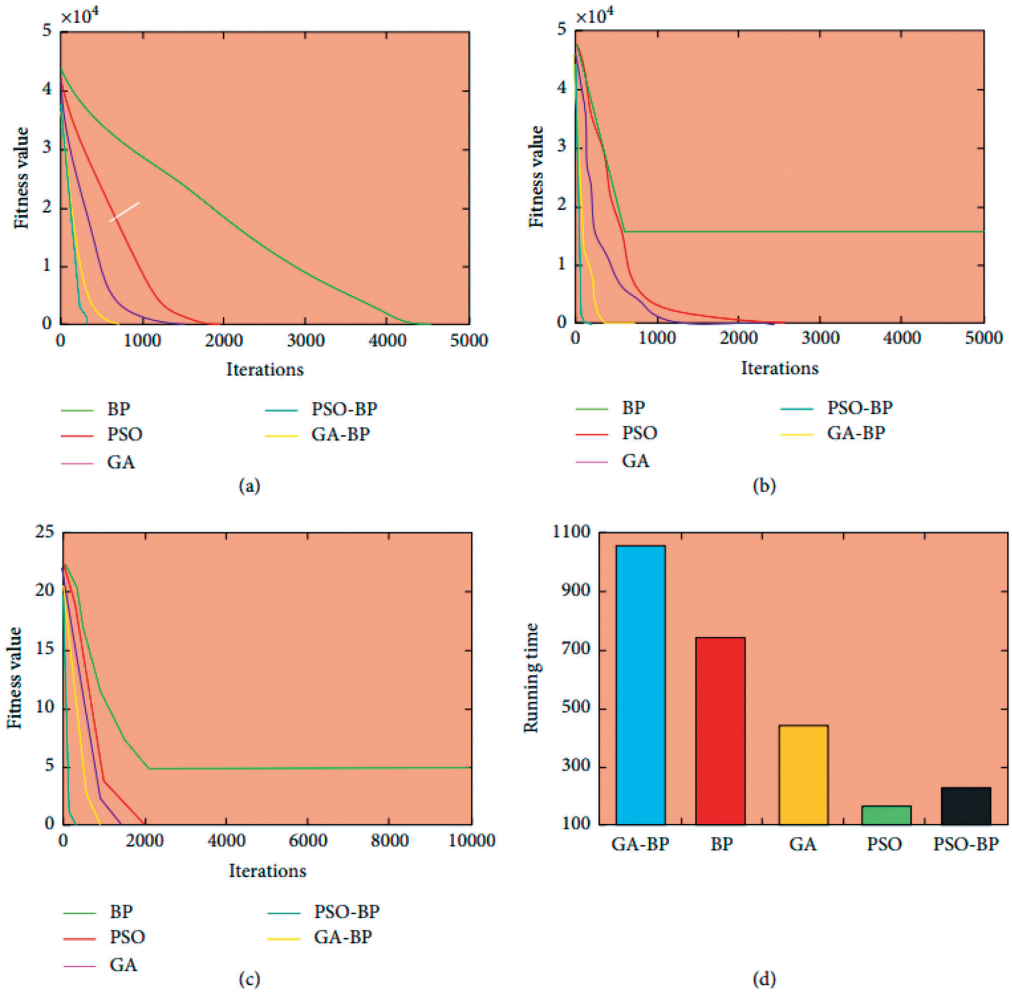


Рис. 2 Показатели сходимости пяти алгоритмов. (a) Первое обучение. (b) Второе обучение. (c) Третье обучение. (d) Время

связь по опыту) соответствующих правил безопасности, которые зачастую трудно извлечь вручную;

• система на основе знаний (Knowledge-based system, KBS), в которую передаются производственные правила, ранее выведенные с помощью машинного обучения, для создания базы знаний для инструмента поддержки анализа функциональной безопасности.

Таким образом, использованный в данной работе подход к оценке безопасности железнодорожного транспорта представляет собой гибридный метод, использующий алгоритм классификации, автоматическое обучение на основе правил (RBML) и систему на основе знаний (KBS).

Как показано на рис. 1, методология анализа и оценки безопасности на железной дороге состоит из 11 этапов. Первые восемь шагов выполняются модулем классификации сценариев (CLASCA), а последние три – модулем оценки сценариев (EVALSCA).

Современные информационные технологии все чаще начинают использоваться в управляющем и управляемом оборудовании, и от их корректной работы зависят жизнь и здоровье людей. Информационная безопасность является неотъемлемым атрибутом обеспечения комплексной функциональной безопасности и также требует новых эффективных методов оценки и доказательства безопасности [6].

Так, например, в работе [7] исследовался процесс доказательства безопаности сложной информационной системы с помощью искусственного интеллекта.

Сравнивались показатели сходимости, скорость работы и точность алгоритма нейронной сети с обратным распределением ошибки (BP), метода роя частиц (PSO), генетического алгоритма, GA-PSO и алгоритма PSO-BP при исследовании рисков работы информационной системы (рис. 2).

По итогу имитационного эксперимента ошибка алгоритма PSO-BP при прогнозировании рисков информационной системы практически равна 0, ошибка традиционного алгоритма BP составляет 3,87, а максимальная ошибка алгоритма PSO – 1,12 единиц.

Однако стоит отметить, что существенным недостатком предложенного метода является необходимость в уже заранее известном перечне возможных рисков для исследуемой системы, недостаточность которых отмечают авторы данной работы.

В целом можно сказать, что применение методов оценки доказательства безопасности для систем с искусственным интеллектом является слабо исследованной областью, которая должна опираться как на

опыт успешно внедренных стандартов, так и на новые разработки [8].

В особенности данная проблема сегодня остро стоит для беспилотных автомобилей, а также встречается в задачах применения искусственного интеллекта для непосредственного управления оборудованием, где не хватает документов, регламентирующих методы оценки безопасности. Существует множество работ, посвященных этой теме, в том числе комплексных исследований ([7] и т.п.), в которых предлагаются способы решения проблемы недостатка методов оценки безопасности, однако не включающих в себя полноту доказательства безопасности для искусственного интеллекта.

Рассмотрим, каким образом вопросы управления безопасностью могут быть имплементированы в процессе реализации графика движения поездов (ГДП). Следует отметить, что Международным союзом железных дорог (МСЖД) переход к адаптивному ГДП и управлению им на основе жизненного цикла рассматривается как важнейшее направление цифровой трансформации железных дорог [9].

Понятие жизненного цикла ГДП включает в себя весь набор фаз – от концепции, определения условий эксплуатации, до собственно информационной имплементации и фазы логирования по итогам исполнения ГДП, каждая из которых обращается к соответствующим информационным полям, раскрываемым в соответствующей информационной модели.

Эти параметры могут задаваться нормативным способом – из соответствующей базы данных – либо с помощью анализа входной информации каким-либо интеллектуальным алгоритмом, в том числе с использованием примеров машинного обучения и исторического контекста.

До настоящего времени в литературе не рассматривалась взаимосвязь фаз жизненного цикла ГДП с вопросами функциональной надежности и безопасности графика движения поездов. Хотя, по сути, каждое из значений параметров на фазах ГДП определяет, фактически, тот или иной уровень безопасности на линии.

Совокупность устройств автоматики, систем передачи данных, человеко-машинных систем (работа диспетчера, машиниста, дежурного по станции) является элементами функциональных сценарных деревьев, каждое из которых приводит к оценке риска технического или технологического отказа.

В результате для ГДП на каждой фазе можно сформировать сценарий опасных отказов и предусмотреть защитные мероприятия. Здесь термин «отказ» следует трактовать расширительно, включая и широкий класс тех ситуаций, при которых уровень безопасности не ниже нормативного, но пропускная способность участка не позволяет пропустить заданный объем поездопотока [10].

Наиболее эффективным методом при этом может быть применение марковских цепей. Для каждой ветви сценария таким образом формируются марковские цепи с заданными интенсивностями перехода из состояния в состояние, компактно записываемые в матричном виде.

При этом было бы крайне уместно применение к данной области методологии УРРАН [11]. Это позволит сформировать комплексный подход к управлению функциональной безопасностью и надежностью ГДП, в котором ключевые показатели – те самые интенсивности переходов – будут оцениваться с помощью методов Data Science.

Таким образом, возможен переход к триединству моделей – исторический ландшафт, динамический ландшафт и прогнозный ландшафт данных, – построенному на единых принципах и позволяющему работать с информационными моделями данных применительно к различным временным горизонтам и в соответствии с локальными целями. Разумеется, для получения достоверных результатов получаемые с помощью Big Data данные необходимо подвергнуть фильтрации от шумов, валидации и другим стандартным процедурам.

В настоящее время ГДП реализуется в виде конкретного управления объектами: формировирование маршрутов поездов, контроль занятости секций и стрелочных групп и т.п., которые связаны с конкретными временными параметрами. Особенную сложность представляет

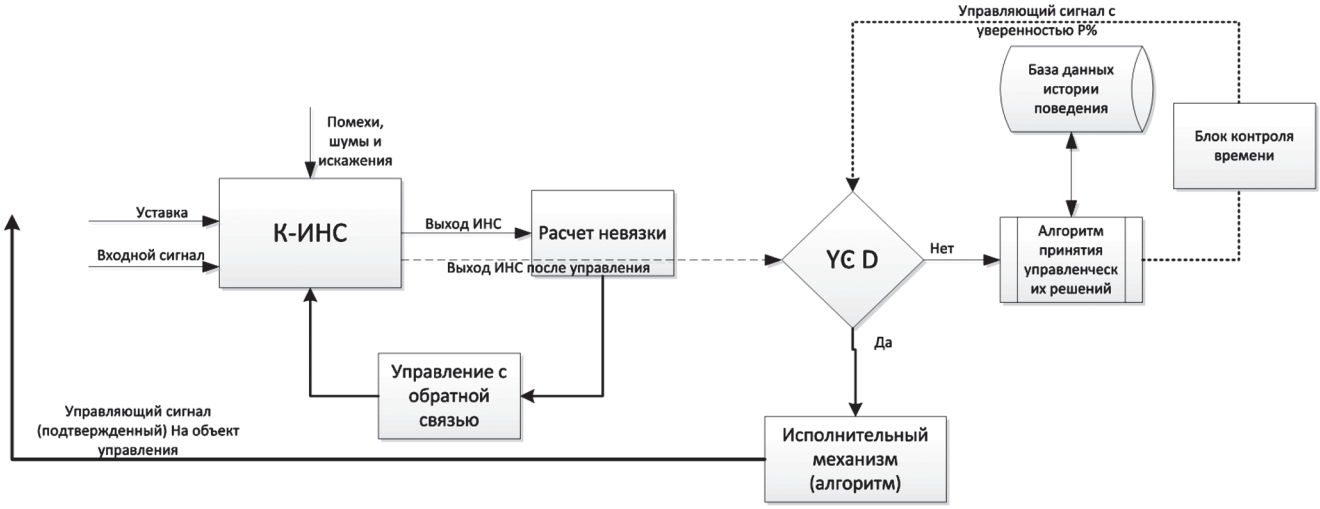


Рис. 3 Принципиальная схема контролируемой ИНС

то, что измененение состояний объектов на транспорте не отражается в нормативных ГДП, для которых изменения фиксируются не чаще одного раза в сутки. Переход к адаптивному ГДП и подпитка его данными, сформированными на основе Big Data, приведут к сокращению длительности переходного процесса, возникающего в ходе нормализации эксплуатационной обстановки при том или ином возмущении. В настоящий момент при действующей технологии без использования методов Big Data график во многом не успевает за эволюцией состояния объектов.

В [12] рассматривался вопрос контролируемых искусственных нейронных сетей (ИНС) в связи с их использованием в практике управления с целью обеспечения требуемой функциональной безопасности систем.

Традиционно для систем управления устойчивость оценивается по Ляпунову, в этом случае поведение устойчивой системы со 100% вероятностью можно представить в окрестности ε-трубки [13].

Для рассматриваемых контролируемых систем, в которых устойчивость появляется за счет введения алгоритма-супервайзера, говорить о строгой устойчивости по Ляпунову некорректно.

Рассмотрим функционирование представленной схемы (см. рис. 3). На первом шаге на вход контролируемой ИНС поступает внешний сигнал, сеть работает в режиме управляемой по выходу системы. Выход сети (с добавлением управления с обратной связью) подается на формальную проверку. Если решение принадлежит множеству допустимых процессов D, то такой сигнал подается на исполнительный механизм и далее на объект управления (которым может выступать и сеть). Если же выходной сигнал выходит за границы множества допустимых процессов, то срабатывает ограничитель. Ограничитель представлен в виде истории протекания процессов и реакции на конкретную реализацию (алгоритм принятия управленческих решений без четкого указания на природу алгоритма). Данный алгоритм предлагает решение (в терминах вектора выхода) с уверенностью P%. Если решение признается принадлежащим множеству допустимых процессов, то оно поступает на исполнительный механизм.

Уточняя особенности предложенной схемы, заметим, что, во-первых, К-ИНС обладает задержкой (если правильное решение не вырабатывается на втором шаге, то длительностью свыше 2 шагов и до бесконечности, пока не будет грубо прервано ЛПР с помощью блока контроля времени), а во-вторых, алгоритмы оценки допустимости и выработки решений в супервайзере должны быть достаточно быстродействующими, чтобы общая задержка была разумной по времени. Кроме того, уровень уверенности P всегда будет меньше 100%.

Помимо этого, в составе данной схемы следует предусмотреть проверку на принадлежность значений выхода множеству допустимых процессов D. Оценку границ области D, постоянную корректировку границ ε-трубки устойчивости, выявление закономерностей работы ограничителя необходимо производить с использованием алгоритмов и методов обработки данных Big Data.

Распространение этой практики (применения К-ИНС и, шире, контролируемых алгоритмов машинного обучения) на область работы с данными для ГДП обеспечивает возможность перехода к функционально надежному и адаптивному расписанию. Данная гипотеза подлежит дополнительному изучению, так как необходимо:

1.Доказать управляемость алгоритмов и методов обработки информации хотя бы «по выходу»;

2.Синтезировать практически реализуемое управление тем или иным методом и оценить его устойчивость.

Такой подход позволил рассмотреть варианты конкретной реализации частично управляемых интеллектуальных систем в [10]. Впервые же в литературе представление о частично управляемых (по выходу) ИНС с переменной проводимостью сигнала было отражено в работах, выполненных в рамках гранта РФФИ №17-20-01065 «Разработка теории нейросетевого управления железнодорожными транспортными системами» [14, 15]. Сформулированные там положения об управлении ИНС могут в принципе быть распространены на иные алгоритмы машинного обучения. Только после проведения подобных исследований стоит переходить к конкретной программно-технической реализации.

Следует заметить, что идея контролируемых таким образом алгоритмов может распространяться не только на ИНС, но и на другие интеллектуальные алгоритмы. При этом не следует безусловно отвергать и действующие на сегодня правила и принципы строгой верификации ветвей алгоритмов model checking [16].

Практическая область применения изложенных в статье результатов

В настоящий момент на Московском центральном кольце (МЦК) и станции Лужская активно внедряются беспилотные системы управления движением поедов. При этом, наиболее сложным вопросом является доказательство безопасности, поскольку основным элементом там является техническое зрение на основе сверточных ИНС. На основе предлагаемых методов уже разработаны подходы для построения конкретных технических реализаций, которые в настоящий момент проходят испытания как на специально созданных лабораторных стендах, так и в условиях реальной эксплуатации [17].

Кроме того, перспективы развития таких транспортных систем лежат в области углубленных исследований средств распознавания сигналов (анализ звуков, техническое зрение, системы самодиагоностики и т.п.). Вопросы интерпретации показаний датчиков, сенсорных элементов и связанных с ними систем принятия решений находятся в тесной связи с предложенными алгоритмами. В [18] предлагается построение единой системы доказательств для каждой интеллектуальной автономной транспортной системы, в этой системе выделяется зона, не охваченная SIL-4, это зона «Интеллектуальной системы управления и обеспечения безопас-

ности движения поезда» («Intelligent Train Protection»), для которой характерны неопределенность в поведении системы или частичная наблюдаемость. В этих условиях одним из путей преодоления данных разрывов может стать применение приемов обработки больших данных в отношении контролируемых алгоритмов (в том числе и контролируемых ИНС, описанных выше). В особенности полезными эти приемы могут быть при обработке сигналов в рамках концепции MAPE (Monitor – Analyze – Plan – Execute). Выявление и исключение аномальных сигналов позволят уточнить границы множества допустимых процессов D, увеличив в ряде случаев быстродействие алгоритмов принятия решений за счет отключения целой ветви неблагоприятных сценариев.

С учетом выработанных и изложенных в данной статье подходов, а также работ зарубежных коллег, необходимо в любом случае использование методики model checking.

Заключение

Таким образом, в настоящей статье проанализированы современные требования к транспортным системам, в том числе с применением искусственного интеллекта, для наиболее перспективных областей – адаптивного ГДП и беспилотных систем, – что позволяет в дальнейшем формировать целое направление исследований – оценку уровня функциональной безопасности систем с применением ИИ и машинного обучения.

Предлагается перспективная для дальнейших компьютерных исследований конструкция – контролируемая ИНС, обосновываются дальнейшие направления исследования в области интеллектуальных контролируемых систем, включая переход к доказательству безопасности таких систем на основе формальной верификации созданных систем управления.

Библиографический список

1. Грунтов П.С. Централизованные системы автоматизированного управления железными дорогами в условиях рыночных отношений. Минск: БелГУТ, 2001.

2. Осьминин А.Т. Проблемы и пути их научного решения в вопросах эксплуатации железных дорог // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО РЖД. 2015. № 4. С. 41-54.

3. Федунин А.В. Доказательство безопасности компьютерных систем // ММС. 2016. №3.

4. Neema H. Simulation testbed for railway infrastructure security and resilience evaluation. HotSoS ‘20: In Proceedings of the 7th Symposium on Hot Topics in the Science of Security. Association for Computing Machinery, 1, 1–8 (2020).

5. Hadj-Mabrouk H. Contribution of Artificial Intelligence to Risk Assessment of Railway Accidents // Urban Rail Transit. 2019. No. 5. Pp. 104–122.

6. Шубинский И.Б., Шебе Х., Розенберг Е.Н. О функциональной безопасности сложной технической системы управления с цифровыми двойниками // Надежность. 2021. Т. 21. № 1. С. 38-44.

7. Jin Zhang, Jingyue Li. Testing and verification of neural-network-based safety-critical control software: A systematic literature review // Information and Software Technology. 2020. Volume 123.

8. Шубинский И.Б., Шебе Х., Розенберг Е.Н. К оценке безопасности системы автоведения поездов // Надежность. 2021. Т. 21. № 4. С. 31-37.

9. Озеров А.В., Лысиков М.Г., Ольшанский А.М. График движения поездов в составе адаптивной системы управления будущего // Наука и технологии железных дорог. 2021. Т. 5. № 1. С. 50-64.

10. Озеров А.В., Ольшанский А.М. Подходы к оценке функциональной безопасности автоматической системы управления поездом без машиниста // Сборник научных трудов Международной научно-технической конференции «Перспективные информационные технологии». Самара. 2021. С. 504-509.

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

12. Озеров А.В., Ольшанский А.М. О построении модели безопасности сложной автоматической системы транспортного обслуживания // Надежность. 2021. Т. 21. № 2. С. 31-37.

13. Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. М.: Лаб. Базовых Знаний, 2004. 832 с.

14. Розенберг Е.Н. и др. Гибридное нейросетевое управление транспортными системами // Автоматика, связь, информатика. 2017. № 12. С. 2-5.

15. Игнатенков А.В., Ольшанский А.М. Управление величиной ошибки в нейронных сетях // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 4-4.

16. Clarke E.M., Henzinger T.A., Veith H. et al. Handbook of model checking (Vol. 10). Cham: Springer, 2018.

17. Охотников А.Л., Попов П.А. Беспилотное управление локомотивом: вчера, сегодня и завтра // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 8. С. 12-17.

18. Flammini F. et al. A Vision of Intelligent Train Control // (preprint 2022): in Proceedings of the 4th International Conference on Reliability, Safety and Security of Railway Systems (RSSRail-22). Springer LNCS, 2022. (в печати).

References

1. Gruntov P.S. [Centralized systems for automated railway management in market economy conditions]. Minsk: BelGUT; 2001. (in Russ.)

2. Osminin A.T. Problems and ways of their scientific solving on the issues of railroading. *Bulletin of JSC RZD United Academic Council* 2015;4:41-54. (in Russ.)

3. Fedukhin A.V. Mukha Ar.A., Sespedes Garsiya N.V. [Safety case of a computer system]. *MMS* 2016;3:93-101. (in Russ.)

4. Neema H. Simulation testbed for railway infrastructure safety and resilience evaluation. In: Proceedings of the 7th

Symposium on Hot Topics in the Science of Security. Association for Computing Machinery; 2020. P 1–8.

5. Hadj-Mabrouk H. Contribution of Artificial Intelligence to Risk Assessment of Railway Accidents. *Urban Rail Transit* 2019;5:104–122.

6. Shubinsky I.B., Schäbe H., Rozenberg E.N. On the functional safety of a complex technical control system with digital twins. *Dependability* 2021;21(1):38-44.

7. Zhang J., Li J. Testing and verification of neural-network-based safety-critical control software: A systematic literature review. *Information and Software Technology* 2020;123.

8. Shubinsky I.B., Shäbe H., Rozenberg E.N. On the safety assessment of an automatic train operation system. *Dependability* 2021;21(4):31-37.

9. Ozerov A.V., Lysikov M.G., Olshansky A.M. Timetable as part of next-generation adaptive management system. *Nauka i tekhnologii zheleznykh dorog* 2021;5(1):50-64.

10. Ozerov A.V., Olshansky A.M. [Approaches to the assessment of the functional safety of a driverless automatic train control system]. In: International Scientific Conference Proceedings "Advanced Information Technologies and Scientific Computing". Samara; 2021. P. 504-509. (in Russ.)

11. Gapanovich V.A., Shubinsky I.B., Zamyshlyaev A.M. Mathematical and information support of the URRAN system. *Dependability* 2013;1:12-19.

12. Ozerov A.V., Olshansky A.M. Safety model construction for a complex automatic transportation system. *Dependability* 2021;21(2):31-37.

13. Dorf R., Bishop R. Modern control systems. Moscow: Lab. Bazovykh Znaniy; 2004.

14. Rozenberg E.N. et al. [Hybrid neural network-based management of transportation systems]. *Automation, Communications, Informatics* 2017;12:2-5. (in Russ.)

15. Ignatenkov A.V., Olshansky A.M. About neural network error control an optimal control problem. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossiyskoy akademii nauk* 2016;18(4-4):733-738. (in Russ.)

16. Clarke E.M., Henzinger T.A., Veith H. et al. Handbook of model checking (Vol. 10). Cham: Springer; 2018.

17. Okhotnikov A.L., Popov P.A. Self-driving: yesterday, today and tomorrow. *Automation, Communications, Informatics* 2019;8:12-17. (in Russ.)

18. Flammini F. et al. A Vision of Intelligent Train Control. In: Proceedings of the 4th International Conference on Reliability, Safety and Security of Railway Systems (RSSRail-22). Springer LNCS; 2022. (preprint)

Сведения об авторах

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

Ольшанский Алексей Михайлович – кандидат технических наук, руководитель Центра перспективных разработок НТК по РОД и ОПР АО «НИИАС». Адрес: ул. Нижегородская, д. 27, стр.1, Москва, Российская Федерация, 109029. E-mail: a.olshanskiy@vniias.ru

Озеров Алексей Валерьевич – начальник Международного управления АО «НИИАС». Адрес: ул. Нижегородская, д. 27, стр.1, Москва, Российская Федерация, 109029. E-mail: a.ozerov@vniias.ru

Сафронов Роман Александрович – заместитель руководителя НТК АО «НИИАС». Адрес: ул. Нижегородская, д. 27, стр.1, Москва, Российская Федерация, 109029. E-mail: r.safronov@vniias.ru

About the authors

Efim N. Rozenberg, Doctor of Engineering, Professor, First Deputy Director General, JSC NIIAS. Address: 27, bldg 1 Nizhegorodskaya St., 109029, Moscow, Russian Federation, e-mail: elena.baranova@list.ru.

Alexey M. Olshansky, Candidate of Engineering, Head of Centre for Advanced Solutions, Integrated Research and Development Unit for Development of Traffic Management and General Design Solutions. Address: 27, bldg 1 Nizhegorodskaya St., building B, off. 512, Moscow, Russian Federation, 109029, e-mail: a.olshanskiy@vniias.ru.

Alexey V. Ozerov, Head of Foreign Department, JSC NIIAS: 27, bldg 1 Nizhegorodskaya St., 109029, Moscow, Russian Federation, e-mail: a.ozerov@vniias.ru.

Roman A. Safronov, Deputy Head of Integrated Research and Development Unit, JSC NIIAS. Address: 27, bldg 1 Nizhegorodskaya St., 109029, Moscow, Russian Federation, e-mail: r.safronov@vniias.ru.

Вклад авторов в статью

Автором **Розенбергом Е.Н.** выполнена содержательная постановка проблемы, проведен анализ полученных результатов и перспективы его практического применения.

Автором **Ольшанским А.М.** предложена конструкция контролируемых искусственных нейронных сетей, предложено проводить оценку интенсивностей переходов в марковских цепях на основе методов машинного обучения, а также сочетать при анализе функциональной безопасности подходы model checking и принципы построения контролируемых алгоритмов.

Автором **Озеровым А.В.** проведен анализ международных результатов в области применения алгоритмов машинного обучения к исследованию функциональной безопасности, указаны основные перспективные направления оценки уровня безопасности на разных стадиях жизненного цикла графика движения поездов.

Автором **Сафроновым Р.А.** выполнен анализ общих принципов функциональной безопасности и основных подходов к доказательству безопасности систем с искусственным интеллектом.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Надежность, том 22, №2, 2022 / Dependability 2, 2022
Функциональная надежность

УДК 656.7
Оригинальная статья / Original article
https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-47-54

Исследование моделей деформации эмоционального опыта пилота в особых ситуациях полета

Study of the deformation models of a pilot's emotional experience in abnormal in-flight circumstances

Екатерина В. Алтухова[1], Ольга В. Ариничева[1]*, Алексей В. Малишевский[1]
Ekaterina V. Altukhova[1], Olga V. Arinicheva[1], Alexey V. Malishevskii[1]

[1]*Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, Санкт-Петербург, Российская Федерация*
[1]*Saint Petersburg State University of Civil Aviation, Saint Petersburg, Russian Federation*
**2067535@mail.ru*

Екатерина В. Алтухова

Ольга В. Ариничева

Алексей В. Малишевский

Резюме. Цель. *Важное и актуальное значение для решения задачи повышения безопасности полетов имеет получение данных о потенциальной экстремальной работоспособности пилота. С этой целью выполнялась проверка ряда ныне существующих моделей деформации эмоционального опыта пилота с точки зрения совпадения прогностического уровня деформации, полученного по этим моделям, с реальным уровнем деформации при особых ситуациях в полете (поскольку именно эмоциональный опыт пилота и противостоит разрушающему действию стрессового психического напряжения, возникающего в особой ситуации полета).* **Методы.** *В проведенном исследовании были использованы следующие методы: интервью, психологическое диагностирование, математическое моделирование, экспертные оценки. Профессиональные пилоты (10 чел.), имеющие необходимый для данного исследования опыт, давали интервью в свободной форме о своем участии в одной из особых ситуаций из личной практики, которая затем экспертно оценивалась на предмет деформации эмоционального опыта участника. По специальной шкале испытуемые оценивали опасность своей особой ситуации, а также давали оценку 18 особых ситуаций из собранной в Санкт-Петербургском государственном университете гражданской авиации базы данных по особым ситуациям в полете. У всех участников данного исследования также определялся нейротизм с помощью опросника EPI (Eysenck Personality Inventory в адаптации А. Г. Шмелева). На основе этих данных, используя модели, имеющие вид многообразия катастрофы, вычислялась прогностическая деформация эмоционального опыта и сравнивалась с ее экспертной оценкой.* **Результаты.** *Хотя формально одна исследуемая модель (модель А. О. Ленгарова) оказалась несколько лучше, чем другая (модель С. Г. Лобаря), но какой-либо принципиальной разницы между ними не обнаружено. Прогностические значения величины деформации эмоционального опыта слабо и незначимо ($p > 0,1$) коррелируют с экспертной оценкой. Для модели А. О. Ленгарова $r_{корр.} = 0,2678$, а для модели С. Г. Лобаря $r_{корр.} = 0,2199$.* **Выводы.** *На данный момент не существует достоверно доказанной модели деформации эмоционального опыта, требуется дальнейший сбор данных о поведении пилотов в особых ситуациях в полете, их анализ и обобщение. Данное исследование подтвердило наличие, по крайней мере, двух из 8 «флагов катастрофы», согласно теории Рене Тома. То есть гипотеза о том, что модель деформации эмоционального опыта пилота должна иметь вид многообразия «катастрофы сборки», верна. Необходима существенная доработка метода объективизации оценки опасности особых ситуаций в полете, возможно, с использованием полиномиальных аппроксимаций, а также путем расширения базы данных Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации по особым ситуациям, в первую очередь, за счет сбора ситуаций с более современными типами воздушных судов.*

Abstract. Aim. *An important aspect of flight safety is associated with obtaining information on the potential performance of a pilot in emergency situations. For that purpose, the authors tested a number of currently existing deformation models of a pilot's emotional experience in terms of the agreement between the predicted level of deformation obtained using such models and the actual level of deformation in abnormal in-flight circumstances (as the pilot's emotional experience is what resists the destructive action of psychological stress that occurs in abnormal in-flight circumstances).* **Methods.** *The conducted study used the following methods: interview, psychological diagnostics, mathematical simulation, expert evaluation. Professional pilots (10 people) who have a level of experience sufficient for this research were interviewed in free form on their personal involvement in abnormal situations that is later evaluated by experts in terms of deformation of emotional experience. Using a special scale, the test subjects evaluated the hazard of their respective abnormal situation, as well as estimated*

18 abnormal in-flight situations out of the database collected by the Saint Petersburg State University of Civil Aviation. All study participants were also tested for neuroticism using the Eysenck Personality Inventory (EPI) (adapted by A.G. Shmeliov). Using that data and models in the form of disaster variety, the predicted deformation of the emotional experience was calculated and compared with the expert estimate. **Results.** *While, formally, one of the examined models (A.O. Lengarov's model) proved to be somewhat superior as compared to the other one (S.G. Lobar's model), but no fundamental difference between them was identified. The predictive values of emotional experience deformation loosely and insignificantly correlate ($p > 0.1$) with the expert estimate. For A.O. Lengarov's model $r_{corr.} = 0.2678$, while for S.G. Lobar's model $r_{corr.} = 0.2199$.* **Conclusions.** *Currently, there is no proven, reliable model of emotional experience deformation. It is required to further collect, analyse and generalise data on pilot behaviour in abnormal in-flight circumstances. This study confirmed the presence of at least two out of eight "catastrophe flags" according to Ren Thom. Thus, the hypothesis that the model of a pilot's emotional experience deformation is to have the form of fold catastrophe is correct. The method of objectification of abnormal in-flight circumstance hazard evaluation is to be significantly improved, probably, with the use of polynomial approximations, as well as by expanding the abnormal circumstance database of the Saint Petersburg State University of Civil Aviation, primarily by collecting situations involving more recent types of aircraft.*

Ключевые слова: *эмоциональный опыт, теория катастроф, математические модели, экспертные оценки.*
Keywords: *emotional experience, catastrophe theory, mathematical models, expert estimates.*

Для цитирования: *Алтухова Е.В., Ариничева О.В., Малишевский А.В. Исследование моделей деформации эмоционального опыта пилота в особых ситуациях полета // Надежность. 2022. №2. С. 47-54. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-47-54*
For citation: *Altukhova E.V., Arinicheva O.V., Malishevsky A.V. Study of the deformation models of a pilot's emotional experience in abnormal in-flight circumstances. Dependability 2022;2:47-54. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-47-54*

Поступила 25.02.2022 г. / **После доработки** 17.03.2022 г. / **К печати** 17.06.2022 г.
Received on: 25.02.2022 / **Revised on:** 17.03.2022 / **For printing:** 17.06.2022.

Введение

В настоящее время человеческий фактор – основная причина авиационных происшествий (АП) в гражданской авиации (ГА). Началом авиационного происшествия всегда бывает особая ситуация (ОС) – «ситуация, возникающая в полете в результате воздействия неблагоприятного фактора или их сочетания и приводящая к снижению безопасности полетов. По степени опасности особые ситуации подразделяют на усложнение условий полета, сложную, аварийную и катастрофическую ситуации»[1], каждая из которых характеризуется, помимо прочего, «увеличением (по нарастающей – *прим. авторов*) психофизиологической нагрузки на экипаж и ухудшением летных характеристик, устойчивости и управляемости воздушного судна, вплоть до превышения предельных ограничений и расчетных условий эксплуатации»[2]. В случае возникновения ОС в полете, очень важной является проблема сохранения экипажем достаточного для успешного завершения полета уровня работоспособности.

Например, экипаж Airbus A321-211 15.08.2019, у которого при столкновении со стаей птиц отказали оба двигателя, сумел сесть на кукурузное поле, а командир воздушного судна (КВС) Boeing 767-233 23.07.1983 сумел с двумя отказавшими двигателями, спасая самолет, выполнить на тяжелом Boeing маневр, который выполняют только планеристы. Можно вспомнить и посадку Ту-124 на Неву 21.08.1963 и Airbus 320-214 на Гудзон 15.01.2009. В обоих случаях с обоими отказавшими двигателями. Все эти и множество других случаев закончились благополучно, поскольку КВС и экипажи, помимо хорошего владения техникой, продемонстрировали выдержку, смелость и эмоциональную уравновешенность.

К сожалению, авиация знает много примеров совершенно иного рода. Достаточно вспомнить, когда экипажи Boeing 737 и в Казани 17.11.2013, и в Ростове 19.03.2016 не сумели уйти на второй круг на исправном самолете, проявив полную растерянность перед лицом опасности. На поведение пилотов во время ОС оказывает воздействие много факторов, и потеря выдержки проявляется тоже по-разному [1]. Часто это проявляется в нарушении коммуникаций в экипаже ВС [1-3], изменении речевой деятельности [4], возникновении конфликтов [5] и пр.

Еще Н. Ф. Михайлик[3], на основе анализа весьма обширной статистики, доказал, что успешные дей-

[1] Зубков Б.В., Прозоров С.Е. Безопасность полетов: учебник. Ульяновск: УВАУ ГА(И), 2012. 451 с.

[2] Там же.

[3] Михайлик Н.Ф. Психологические особенности управления аварийным объектом: дис. … канд. психол. наук. Л., 1975. 138 с.

ствия пилота в ОС зависят, в первую очередь, не от его класса, налета и тому подобного, а от числа ОС, в которых побывал пилот, то есть от его эмоционального опыта.

Эмоциональный опыт (ЭО) – это совокупность знаний, умений и навыков пилота по преодолению экстремальных ситуаций, возникающая и закрепляющаяся на фоне сильных эмоциональных переживаний сугубо важных, ответственных и опасных действий. Это некая устойчивая структура, полученная в результате синтеза множества действий в экстремальных ситуациях и сопутствующих им эмоциональных и волевых психических состояний, запечатленных в эмоциональной памяти [4]. Именно он противостоит разрушающему действию стрессового психического напряжения, которое возникает у пилота в ОС.

Н. Ф. Михайликом было введено понятие деформации эмоционального опыта (ДЭО) в процессе ОС. Причем было выявлено, что она происходит не непрерывно, а дискретно – «по слоям», поскольку ЭО, как и его материальный субстрат, представляет собой многоуровневую иерархическую структуру, в данном случае состоящую из 5 страт: опыта взаимодействия, познавательного, волевого, моторного и биологического опытов. Было замечено, что последовательность разрушения этих страт в процессе ОС у пилотов различна. У одних оно шло последовательно – «одна за одной». У других же происходил «скачок» (см. рис. 1), то есть разрушение сразу ряда страт практически одновременно. Естественно, возник вопрос, с помощью какого математического аппарата можно описать, а, следовательно, и предвидеть возникновение в психике пилота подобного процесса.

В работе [6] Н. Ф. Михайлик выдвинул гипотезу о том, что процесс ДЭО может быть описан с помощью теории катастроф Рене Тома [7]. В дальнейшем ряд исследователей (Р. М. Джафарзаде, А. О. Ленгаров, С. Г. Лобарь) пытались подтвердить данную гипотезу, создав модели ДЭО пилота в ОС в виде некоего многообразия катастрофы [7] (применительно к диспетчерам управления воздушным движением данный вопрос был рассмотрен в работе [8]).

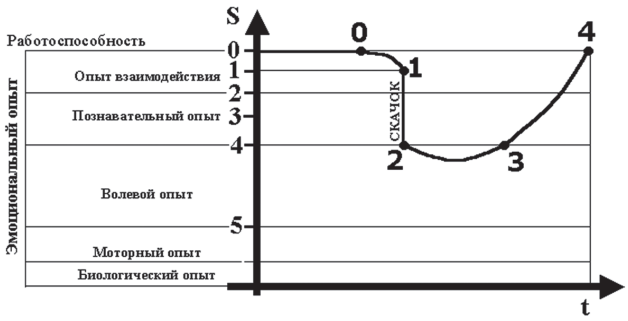


Рис. 1. Особая ситуация, описанная под номером 41 в базе, собранной в Санкт-Петербургском государственном университете гражданской авиации. Схематично представлен порядок деформации эмоционального опыта КВС в процессе развития этой ситуации

Задачей настоящего исследования была проверка разработанных А. О. Ленгаровым и С. Г. Лобарем моделей ДЭО с точки зрения совпадения прогностического уровня ДЭО, определенного по данным моделям, с реальными ситуациями в полете. Получение подобных данных о потенциальной экстремальной работоспособности пилота имеет важное и актуальное значение для решения задачи повышения безопасности полетов.

Материал и методы

В эксперименте, проведенном в ноябре 2020 – феврале 2021 приняло участие десять пилотов различных авиакомпаний. Небольшое количество участников обуславливалось высокой трудоемкостью проводимых с каждым из них исследований и необходимостью первоначальной отработки методики и планирования дальнейших экспериментов по оценке экстремальной работоспособности пилотов.

Критерием включения было наличие опыта полетов не менее 5 лет на ВС вида самолет (вертолет имеет существенно отличную от самолета специфику его эксплуатации) и достаточное знакомство с особенностями эксплуатации тех типов самолетов, ОС с которыми были описаны в базе данных по особым ситуациям, собранным в Санкт-Петербургском государственном университете гражданской авиации (СПбГУ ГА).

Критерием исключения было отсутствие в опыте работы участника достаточно значимых ОС, либо же невозможность оценить на основе интервью с данным участником степень его ДЭО в данной ОС (удаленность данной ОС по времени от момента интервьюирования, неумение участника точно вспомнить и выразить свое эмоциональное состояние и т. п.).

Исследование проводилось в соответствии с основными правилами биоэтики[1] на добровольной основе.

Работа с участниками проводилась в три этапа. На первом этапе, в ходе интервью, участник в свободной форме излагал случившуюся с ним в ходе полетов ОС. Пример подобного изложения приводится ниже с сохранением авторской терминологии.

«Прошло года три после первого самостоятельного полета в качестве КВС на Ту-134. Налет приближался к 2000 часам. Времена девяностых годов, когда советские правила полетов на «нероссийские» экипажи уже не распространялись, а «своих» еще не создали. Рейсы из Гюмри в Москву и обратно выполнялись в зависимости от цены на керосин в аэропортах, находящихся в радиусе час, максимум полтора от Гюмри. На обратном пути надо было заправиться керосином полностью, чтобы хватило на полет из Гюмри в один из этих аэропортов. Наша молодая авиакомпания находилась на полной самоокупаемости, поэтому коммерческая загрузка на максимальный взлетный вес не влияла. Рейс из Москвы

[1] Bioethics / Internet Encyclopedia of Philosophy. URL: https://www.iep.utm.edu/bioethic/

в Гюмри в этот раз выполнялся через Ставрополь. После посадки посыпал снежок, сначала слабенький. Но процедуры оплаты аэропортовских услуг растянулись часа на два. И за эти два часа снег усилился до ливневого. Наконец-то все оплачено, можно лететь. И тут новость! Руководитель полетов поставил нам условие: или через двадцать минут взлетаете или аэродром закрывается на очистку ВПП (взлетно-посадочная полоса – *прим. авторов*) на неопределенное время. За это время успели сдуть с крыльев снег ТОМом (тепловая обдувочная машина – *прим. авторов*), запуститься и вырулить на старт. Длина полосы в Ставрополе была тогда стандартной для СССР, 2500 метров. Взлетный вес больше максимального «всего лишь» на три тонны. Начинаем разбег. Снег на ВПП, толщиной сантиметров десять, сначала на темп роста скорости не влиял. Но вот половина полосы позади, а скорость чуть более ста десяти. И тут появилось ощущение, что какая-то невидимая сила держит самолет за «хвост». Плотный мокрый снег стал той невидимой силой. Что делать? Прекращать взлет явно уже поздно, можно довыпустить закрылки на больший угол, но это надо планировать заранее и обговаривать с экипажем. Продолжаем взлет. Мозг осознал опасность и перешел в режим работы, доставшийся нам от древних предков: как кошка рассчитывает траекторию прыжка на шкаф, так и мы соизмеряли оставшиеся метры ВПП с темпом роста скорости. Все совпало: отрываемся, как говорят, с последней плиты. Уф!!! Повезло на этот раз! Наверное, это было самое впечатляющее напоминание, что летные законы выше любых коммерческих».

В ходе интервью задавались вопросы, позволяющие уточнить степень ДЭО (S) и оценить ее по предложенной Н. Ф. Михайликом [6] шкале:

1. $S = 0$ – деформация эмоционального опыта отсутствует.

2. $S = 1$ – преддеформационное состояние, изменение спектральных и темпоральных характеристик речи пилота, т. е. повышение интонации, крик, вибрация голоса. Неполное восприятие информации, но пилот воспринимает, «видит» других членов экипажа и контролирует их действия.

3. $S = 2$ – взаимодействие между участниками ОС отсутствует. Команды если и подаются, то без сохранения «следов» в памяти, либо не поддаются вовсе. Текст информации от других участников ОС воспринимается плохо или не воспринимается вообще, но при этом познавательный уровень ЭО не деформирован.

4. $S = 3$ – частичная деформация познавательного уровня ЭО, явные затруднения с принятием решений, приоритетные направления деятельности участника реализуются не полностью, контроль за выполнением приоритетных действий частично переходит в область бессознательного.

5. $S = 4$ – преодоление опасности на волевом уровне. На этом уровне пилот не знает и (или) не умеет локализовать опасность, но управление ВС не бросает, продолжая полет.

6. $S = 5$ – преодоление опасности на моторном уровне. При состоянии $S = 5$ опасность отображается принципиально неадекватно, оценить степень опасности участнику ОС трудно или даже невозможно.

Шкала достаточно «грубая», что позволяет в какой-то степени сгладить субъективизм экспертных оценок ДЭО. Даже в приведенном примере, достаточно ярком и хорошо описанном, выбор степени ДЭО достаточно сложен. Очевидно, что S не может быть менее 2, поскольку коммуникация в экипаже, очевидно, нарушена. КВС явно выполняет взлет сам, «не видя» других членов своего экипажа. Однако экспертная оценка все же здесь склонилась к $S = 3$, поскольку управление ВС шло уже явно на уровне динамических стереотипов, а не на полностью осознанном уровне.

На втором этапе участники были протестированы с помощью опросника EPI (Eysenck Personality Inventory в адаптации А. Г. Шмелева)[1] для определения темперамента. При этом определялись экстраверсия (E) и нейротизм (n). В данном же исследовании были использованы только сведения о нейротизме участников.

На третьем этапе участники должны были оценить опасность 18 особых ситуаций, использовавшихся в диссертационных работах Р. М. Джафарзаде[2], А. О. Ленгарова[3] и С. Г. Лобаря[4]. ОС были выбраны с учетом достаточных для объективной оценки ОС знаний по эксплуатации данного типа ВС всеми участниками эксперимента. Кроме того, каждый из участников давал субъективную оценку опасности (φ_S) своей собственной ситуации. Оценка всех ОС (и своей, и из базы данных) производилась по шкале от 0 до 1, где $\varphi_S = 0$ соответствует полному отсутствию опасности, а $\varphi_S = 1$ – катастрофической ситуации, когда от участника ОС уже ничего не зависит.

Ранее А. В. Малишевским была создана методика, вошедшая в качестве одной из составляющих в ряд патентов, в первую очередь [9], и использующая в качестве исходных данных врожденную эмоциональную устойчивость пилота, определяемую его нейротизмом, и величину, характеризующую адекватность оценки опасности этим пилотом. В данной методике использовалась специальная процедура объективизации субъективных оценок пилотами опасности тех особых ситуаций в полете, участниками которых они были. Если обозначить как φ_{Si} и φ_{Oi} – соответственно, субъективную (то есть определенную самим пилотом) и объективную (определенную группой экспертов) оценки опасности некоторой i-й ОС и иметь для испытуемого значения величин

[1] Карелин А.А. Большая энциклопедия психологических тестов. М.: Эксмо, 2007. 416 с.

[2] Джафарзаде Р.М. Научные основы эксплуатации воздушных судов в экстремальных условиях: дис. … д-ра техн. наук. Баку, 2005. 295 с.

[3] Ленгаров А.О. Оценка работоспособности члена экипажа воздушного судна в особых ситуациях: дис. … канд. техн. наук. СПб., 1998. 159 с.

[4] Лобарь С.Г. Совершенствование методов профессиональной подготовки членов экипажа воздушного судна к действиям в особых ситуациях полета: дис. … канд. техн. наук. СПб., 2002. 216 с.

$\{\varphi_{Si}, \varphi_{Oi}\}^{N}_{i=1}$ для набора N ОС из некоторого банка данных, то можно по методу наименьших квадратов [10] построить уравнение линейной регрессии

$$\varphi_{NARA} = a\varphi_S + b\,, \qquad (1)$$

где:

$$a = \frac{N\left(\sum_{i=1}^{N}\left(\varphi_{Si}\varphi_{Oi}\right)\right) - \left(\sum_{i=1}^{N}\varphi_{Si}\right)\left(\sum_{i=1}^{N}\varphi_{Oi}\right)}{N\left(\sum_{i=1}^{N}\varphi_{Si}^2\right) - \left(\sum_{i=1}^{N}\varphi_{Si}\right)^2},$$

$$b = \frac{\left(\sum_{i=1}^{N}\varphi_{Oi}\right)\left(\sum_{i=1}^{N}\varphi_{Si}^2\right) - \left(\sum_{i=1}^{N}\varphi_{Si}\right)\left(\sum_{i=1}^{N}\left(\varphi_{Si}\varphi_{Oi}\right)\right)}{N\left(\sum_{i=1}^{N}\varphi_{Si}^2\right) - \left(\sum_{i=1}^{N}\varphi_{Si}\right)^2}.$$

Эта зависимость, как правило, отличается от идеальной $\varphi_{NARA} = \varphi_S$ и показывает, насколько пилот склонен завышать или занижать опасность ОС. Величина φ_{NARA} получила название условно-объективной оценки опасности, и в нашем эксперименте определялась из выражения (1) для φ_S – субъективной оценки опасности пилотом его собственной ситуации, а параметры a и b вычислялись по его оценкам опасности 18 ситуаций из базы особых ситуаций, собранной в СПбГУ ГА и экспертных оценок опасности этих ситуаций.

Далее, используя модели ДЭО пилота в виде многообразия катастрофы вида «сборка Уитни» [7], разработанных А. О. Ленгаровым и С. Г. Лобарем, нами производился расчет (см. табл. 1) прогнозируемой по этим моделям величины ДЭО (по шкале S) из выражения:

$$S_j = \frac{z_j}{\vartheta_z} + S_0, \qquad (2)$$

где:

$$z_1 = \alpha + \beta,\ z_2 = -\frac{\alpha+\beta}{2} + i\frac{\alpha-\beta}{2}\sqrt{3}\,,$$

$$z_3 = -\frac{\alpha+\beta}{2} - i\frac{\alpha-\beta}{2}\sqrt{3}\,,$$

$$\alpha = \sqrt[3]{-\frac{y}{2} + \sqrt{Q}}\,,\ \beta = \sqrt[3]{-\frac{y}{2} - \sqrt{Q}}\,,\ Q = \left(\frac{x}{3}\right)^3 + \left(\frac{y}{2}\right)^2,$$

$$x = \vartheta_{xa}\left(\varphi_{NARA} - \varphi_0\right) + \vartheta_{ya}\left(n - n_0\right),$$

$$y = \vartheta_{xb}\left(\varphi_{NARA} - \varphi_0\right) + \vartheta_{yb}\left(n - n_0\right),$$

φ_0, n_0, S_0 – координаты начала системы координат xyz в прямоугольной системе координат φ, n, S, a ϑ_z, ϑ_{xa}, ϑ_{ya}, ϑ_{xb}, ϑ_{yb} – коэффициенты, изменяющие масштаб по соответствующим осям и разворачивающие эти оси относительно осей исходной системы координат.

Для расчета прогностической величины деформации эмоционального опыта (S) был разработан специальный скрипт для программы MATLAB R2021b v9.11[1].

Результаты и обсуждение

Опуская промежуточные результаты, приведем результаты расчета прогностической величины деформации эмоционального опыта по моделям А. О. Ленгарова и С. Г. Лобаря и сравнения их с экспертной оценкой ДЭО в виде сводной таблицы (см. табл. 2). В табл. 2 значение Δ_S это разность между экспертной оценкой деформации ЭО (S_{Expert}) и прогностической оценкой ДЭО (S) по каждой из моделей.

[1] MathWorks MATLAB R2021b v9.11 русская версия с ключом. URL: https://1progs.ru/matlab/

Табл. 1. Параметры линейного преобразования для различных математических моделей процесса деформации эмоционального опыта ($N_{ОС}$ – количество особых ситуаций, использованное при разработке модели)

	$N_{ОС}$	ϑ_{xa}	ϑ_{ya}	ϑ_{xb}	ϑ_{yb}	ϑ_z	φ_0	n_0	S_0
Модель А. О. Ленгарова	40	0,6179	-0,1428	-4,2057	-0,103	0,5704	2,5105	0,625	9
Модель С. Г. Лобаря	58	-3,5467	-0,1876	3,5046	-0,0152	-0,5632	1,5750	0,51	4,04

Табл. 2. Результаты расчета прогностической величины деформации эмоционального опыта и сравнения их с ее экспертной оценкой

Пилот	n	φ_S	φ_{NARA}	S_{Expert}	Модель А. О. Ленгарова		Модель С. Г. Лобаря	
					S	Δ_S	S	Δ_S
1	4	0,7	0,4629	3	0,99	2,01	0,79	2,21
2	8	0,6	0,5008	1	1,06	0,06	1,81	0,81
3	9	0,5	0,3725	0	0,63	0,63	-0,20	0,20
4	8	0,9	0,5093	0	1,09	1,09	-0,02	0,02
5	9	0,5	0,4590	1	0,89	0,11	-0,20	1,20
6	14	0,7	0,5825	2	4,32	2,32	1,49	0,51
7	8	0,6	0,4068	2	0,75	1,25	-0,05	2,05
8	12	0,5	0,3990	1	0,62	0,38	-0,61	1,61
9	9	0,5	0,4595	2	0,89	1,11	-0,20	2,20
10	8	0,5	0,5170	1	1,12	0,12	1,66	0,66
						$\sum = 9{,}08$		$\sum = 11{,}47$

Настоящее исследование, имевшее целью сравнение различных моделей ДЭО, показало необходимость существенной доработки практически всех использовавшихся методик [4, 9].

Из табл. 2 видно, что хотя формально модель, разработанная А. О. Ленгаровым несколько лучше, чем модель, разработанная С. Г. Лобарем (к сожалению, из-за недостатка ряда данных не удалось сравнить их с моделью, разработанной Р. М. Джафарзаде), но какой-то принципиальной разницы между ними все же нет. Прогностические значения величины ДЭО (S) слабо и незначимо ($p > 0{,}1$) коррелируют с экспертной оценкой ДЭО (S_{Expert}). Для модели А. О. Ленгарова $r_{корр.} = 0{,}2678$, а для модели С. Г. Лобаря $r_{корр.} = 0{,}2199$. (Между собой величины ДЭО по этим моделям коррелируют сильнее $r_{корр.} = 0{,}5088$, но даже до тенденции достоверной связи ($p \leq 0{,}1$) эта корреляция не дотягивает). Следует еще отметить, что если при решении уравнения (2) в модели А. О. Ленгарова получался только один действительный положительный корень, то в модели С. Г. Лобаря практически везде получались отрицательные значения S, что теории, в общем-то, несколько противоречит, ибо отрицательная S не имеет физического смысла.

Еще один неоднозначный момент связан с методикой объективизации субъективных оценок опасности ОС [9]. Как видно из табл. 3, практически все испытуемые завышали субъективную (то есть соответствующую их мнению) степень опасности ОС (φ_S) из базы данных СПбГУ ГА, по сравнению с объективной (экспертной) оценкой этой опасности (φ_O), на основе которой и разрабатывались все вышеупомянутые модели. В итоге, как видно из табл. 2, их субъективная оценка собственной ситуации (φ_S) при расчете условно объективной оценки ее опасности (φ_{NARA}) из выражения (1) занижалась.

В соответствии с [9] $\varphi = 0{,}5$ соответствовала сложной, а $\varphi = 0{,}7$ – аварийной ситуации. При этом сложная ситуация характеризуется: заметным повышением психофизиологической нагрузки на экипаж, или заметным ухудшением характеристик устойчивости и управляемости или летных характеристик, или выходом одного или нескольких параметров полета за эксплуатационные ограничения, но без достижения предельных ограничений и (или) расчетных условий. Аварийная ситуация характеризуется: значительным повышением психофизиологической нагрузки на экипаж, или значительным ухудшением характеристик устойчивости и управляемости или летных характеристик, или приводящая к достижению (превышению) предельных ограничений и (или) расчетных условий. В приведенном примере описания ОС (в табл. 2 и табл. 3 это пилот 1) имеются все три признака аварийной ситуации, то есть его собственная оценка $\varphi_S = 0{,}7$ явно ближе к истине, нежели условно объективная $\varphi_{NARA} = 0{,}4629$. Если пересчитать прогностические значения ДЭО (S) по значению $\varphi_{NARA} = \varphi_S = 0{,}7$, то по модели А. О. Ленгарова получится $S = 5{,}1241$, то есть отклонение от экспертной оценки $S_{Expert} = 3$ будет $\Delta_S = -2{,}1241$, практически такое же, но в другую сторону, и еще менее похожее на реальное значение ДЭО. А вот по модели С. Г. Лобаря $S = 2{,}3750$, что уже достаточно близко к экспертному значению ($\Delta_S = 0{,}625$). Еще один фактор, возможно оказавший влияние на недостатки в методике объективизации оценок, – это то, что в качестве аппроксимации была выбрана линейная регрессия, поскольку расчеты по методу наименьших квадратов [10] для нелинейных аппроксимаций были слишком сложны для условий середины 90-х годов. Вероятно, ныне необходимо исследовать возможность перехода к полиномиальным аппроксимациям. Ну и наконец,

Табл. 3. Субъективные (φ_S) и объективные (φ_O) оценки особых ситуаций из базы, собранной в СПбГУ ГА

ОС	Пилот / φ_O	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		φ_S									
1	0,6	0,7	0,1	0,3	0,5	0,3	0,2	0,5	0,6	0,2	0,3
2	0,85	0,9	0,5	0,5	1,0	0,5	0,7	0,8	0,8	0,7	0,7
3	0,15	0,7	0,2	0,5	0,9	0,5	0,5	0,6	0,7	0,5	0,2
4	0,1	0,5	0,2	0,6	0,3	0,4	0,2	0,7	0,2	0,5	0,2
12	0,47	0,4	0,3	0,9	0,6	0,5	0,6	0,8	0,7	0,2	0,2
13	0,5	0,8	0,3	1,0	1,0	0,4	0,5	0,7	0,4	0,3	0,3
14	0,375	0,9	0,7	0,8	1,0	0,5	0,9	0,9	1,0	0,9	0,8
18	0,4	1,0	0,6	1,0	0,9	0,6	0,5	0,7	0,8	0,5	0,5
19	0,1	0,8	0,4	0,3	0,5	0,6	0,3	0,6	0,5	0,4	0,3
20	0,625	0,3	0,3	1,0	0,4	0,8	0,5	0,7	0,8	0,3	0,4
21	0,2	0,7	0,5	0,8	0,8	0,3	0,3	0,5	0,6	0,2	0,2
23	0,625	0,9	0,3	1,0	0,9	0,5	0,5	0,6	1,0	0,4	0,6
24	0,625	0,6	0,5	1,0	1,0	0,5	0,7	0,7	0,9	0,5	0,6
25	0,44	1,0	0,3	1,0	0,7	0,7	0,5	0,7	0,5	0,2	0,5
26	0,625	1,0	0,3	0,9	0,9	0,5	0,6	0,6	0,8	0,4	0,6
29	1,0	0,6	0,4	1,0	0,9	0,6	0,7	0,8	0,6	0,4	0,7
30	0,45	0,3	0,2	1,0	0,5	0,5	0,4	0,6	0,3	0,2	0,3
31	0,2	0,8	0,3	1,0	0,9	0,5	0,6	0,7	0,4	0,6	0,4

возможно, что малое число испытуемых не позволило выявить более существенные закономерности.

Выводы

Создание адекватных реальности моделей ДЭО пилота в ОС является важной и актуальной проблемой в деле дальнейшего обеспечения безопасности полетов ГА.

Данное исследование подтвердило показанное в работах [6, 9] наличие, по крайней мере, двух из 8 «флагов катастрофы» [7]: катастрофических скачков и зоны недостижимости (рис. 2). То есть изначальная гипотеза Н.Ф. Михайлика [6] о том, что модель ДЭО пилота должна иметь вид многообразия катастрофы сборки [7] по полученным нами данным, так же, как и по данным из работ Р.М. Джафарзаде[1], А.О. Ленгарова[2] и С.Г. Лобаря[3], вполне верна.

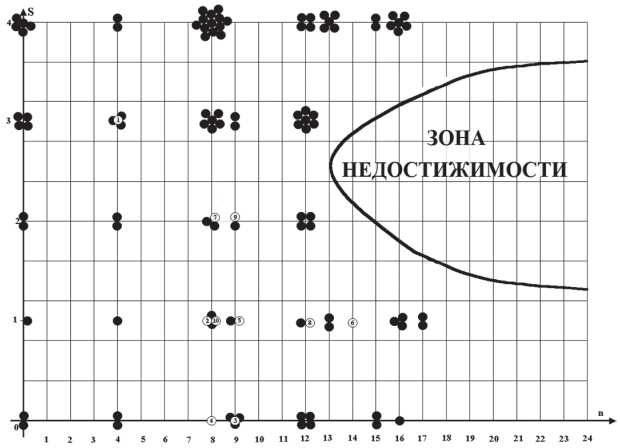


Рис. 2. Проекция многообразия катастрофы на плоскость «состояние ДЭО – нейротизм» (без номеров показаны координаты 97 ОС, использованных в модели Р.М. Джафарзаде)

Необходима существенная доработка методики объективизации оценки опасности ОС, возможно, с использованием полиноминальных аппроксимаций, а также путем расширения базы данных СПбГУ ГА по ОС в полете, в первую очередь, за счет сбора ситуаций с более современными типами воздушных судов.

На данный момент не существует достоверно доказанной модели ДЭО, требуется дальнейший сбор данных о поведении пилотов в ОС, их анализ и обобщение.

Библиографический список

1. Артемов А.Д., Лысаков Н.Д., Лысакова Е.Н. Человеческий фактор в эксплуатации авиационной техники: монография. М.: Московский авиационный институт (национальный университет), 2018. 156 с.

2. Бирюков А.А. Особенности повышения квалификации пилотов в области формирования готовности к действиям в чрезвычайной ситуации // Современные проблемы науки и образования. 2019. № 5. С. 55-65. DOI: 10.17513/spno.29248

3. Бирюков А.А. Опытно-экспериментальная работа по формированию готовности пилотов гражданской авиации к действиям в чрезвычайной ситуации // Евразийский Союз Ученых. 2020. Т. 1. № 2 (71). С. 18-26. DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2020.1.71.581

4. Лейченко С.Д., Малишевский А.В., Михайлик Н.Ф. Человеческий фактор в авиации. В 2 т. Т. 2. СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации; Кировоград: Государственная летная академия Украины, 2006. 512 с.

5. Arinicheva O.V., Lebedeva N.A., Malishevskii A.V. Intellectual functioning in students and conflict management strategies // Revista Espacios. 2019. Vol. 40. № 44. P. 29. URL: http://www.revistaespacios.com/a19v40n44/19404429.html

6. Михайлик Н.Ф., Цитцер В.А. Исследования возможности использования теории катастроф для оценки работоспособности пилота в особой ситуации // Оптимизация летной эксплуатации и профессиональной подготовки летного состава. Психофизиологические проблемы профессиональной работоспособности специалистов гражданской авиации: сб. науч. тр. Академии гражданской авиации. СПб., 1994. С. 98-106.

7. Gilmore R. Catastrophe theory for scientists and engineers. Toronto, Canada, General Publishing Company Ltd, 1993. 666 p.

8. Arinicheva O., Dalinger Ya., Malishevskii A., et al. Objectification of subjective estimation of abnormal cases danger in air traffic control // Transport Problems. 2018. Vol. 13. Issue 1. Pp. 5-18. DOI: 10.21307/tp.2018.13.1.1

9. Способ оценки работоспособности членов экипажа воздушного судна: пат. 2128006 Российская Федерация, МПК7 A 61 B 5/16 / Михайлик Н. Ф. (RU), Джафарзаде Р.М. (AZ), Малишевский А.В. (RU) – 97114639/14; заявл. 26.08.97; опубл. 27.03.99, Бюл. № 9. С. 274.

10. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. Л.: Физматгиз, 1962. 352 с.

References

1. Artiomov A.D., Lysakov N.D., Lysakova E.N. [Human factor in the operation of aviation equipment: a monograph]. Moscow; 2018. (in Russ.)

2. Biryukov A.A. Pilots' recurrent training in the field of readiness to act in emergency situations specifics. *Modern problems of science and education* 2019;5:55-65. (in Russ.)

3. Biryukov A.A. [Experimental work aimed at developing commercial pilots' preparedness to acting in emergency

[1] Джафарзаде Р.М. Научные основы эксплуатации воздушных судов в экстремальных условиях: дис. … д-ра техн. наук. Баку, 2005. 295 с.

[2] Ленгаров А.О. Оценка работоспособности члена экипажа воздушного судна в особых ситуациях: дис. … канд. техн. наук. СПб., 1998. 159 с.

[3] Лобарь С.Г. Совершенствование методов профессиональной подготовки членов экипажа воздушного судна к действиям в особых ситуациях полета: дис. … канд. техн. наук. СПб., 2002. 216 с.

situations]. *Eurasian Union of Scientists* 2020;2(71):18-26. DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2020.1.71.581. (in Russ.)

4. Leychenko S.D., Malishevsky A.V., Mikhaylik N.F. [The human factor in aviation. In 2 volumes. Volume 2]. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Civil Aviation; Kirovograd: State Flight Academy of Ukraine; 2006. (in Russ.)

5. Arinicheva O.V., Lebedeva N.A., Malishevskii A.V. Intellectual functioning in students and conflict management strategies. *Revista Espacios* 2019;40(44):29. Available at: http://www.revistaespacios.com/a19v40n44/19404429.html.

6. Mikhailik N.F., Tsitser V.A. [Research of the opportunities of using the catastrophe theory for evaluating a pilot's condition in a special situation]. In: [Optimization of flight operations and professional training of flight personnel. Psychophysiological aspects of professional performance of civil aviation personnel: proceedings of the Academy of Civil Aviation]. Saint Petersburg; 1994. P. 98-106. (in Russ.)

7. Gilmore R. Catastrophe theory for scientists and engineers. Toronto (Canada): General Publishing Company Ltd; 1993.

8. Arinicheva O., Dalinger Ya., Malishevskii A. et al. Objectification of subjective estimation of abnormal cases danger in air traffic control. *Transport Problems* 2018;13(1):5-18. DOI: 10.21307/tp.2018.13.1.1.

9. [Method of assessing the performance of aircraft crew members]: Patent 2128006 Russian Federation, MPK7 A 61 V 5/16/Mikhailik N.F. (RU), Jafarzade R.M. (AZ), Malishevsky A.V. (RU) – 97114639/14; application 26.08.97; published on 27.03.99, Bul. no 9. P. 274. (in Russ.)

10. Linnik Yu.V. [Least square method and foundations of the mathematical and statistical theory of observation processing]. Leningrad: Fizmatlit; 1962. (in Russ.)

Сведения об авторах

Алтухова Екатерина Владимировна – магистрант ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации». Адрес: ул. Пилотов, д. 38, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196210. E-mail: katerina1798@inbox.ru

Ариничева Ольга Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Летная эксплуатация и безопасность полетов в гражданской авиации» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации». Адрес: ул. Пилотов, д. 38, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196210. E-mail: 2067535@mail.ru

Малишевский Алексей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Летная эксплуатация и безопасность полетов в гражданской авиации» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации». Адрес: ул. Пилотов, д. 38, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 196210. E-mail: 9909395@bk.ru

About the authors

Ekaterina V. Altukhova, Master's Degree Student, Saint Petersburg State University of Civil Aviation. Address: 38 Pilotov St., 196210, Saint Petersburg, Russian Federation. E-mail: katerina1798@inbox.ru.

Olga V. Arinicheva, Candidate of Engineering, Senior Lecturer in Flight Operation and Safety in Civilian Aviation, Saint Petersburg State University of Civil Aviation. Address: 38 Pilotov St., 196210, Saint Petersburg, Russian Federation. E-mail: 2067535@mail.ru.

Alexey V. Malishevskii, Candidate of Engineering, Senior Lecturer in Flight Operation and Safety in Civilian Aviation, Saint Petersburg State University of Civil Aviation. Address: 38 Pilotov St., 196210, Saint Petersburg, Russian Federation. E-mail: 9909395@bk.ru.

Вклад авторов в статью

Алтухова Е.В. Сбор фактического материала, первичная обработка данных.

Ариничева О.В. Обзор и анализ существующего состояния рассматриваемой проблемы, теоретическая составляющая работы.

Малишевский А.В. Организация исследования, теоретическая составляющая работы, обработка полученных результатов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Авторы выражают искреннюю благодарность А. В. Тильте за помощь в первичной обработке фактического материала, а также всем пилотам участникам эксперимента за уделенное время и ответственное отношение к проводимому исследованию.

Оригинальная статья / Original article
https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-55-63

Методология проектирования модели многомерного оценивания привязных высотных платформ на базе мультикоптеров

Methodology for designing the model of multidimensional estimation of tethered high-altitude multicopter-based platforms

Станислав В. Микони[1], Александр В. Полтавский[2], Сергей С. Семёнов[3]*
Stanislav V. Mikoni[1], Alexander V. Poltavsky[2], Sergey S. Semionov[3]

[1]Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, Российская Федерация, [2]Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Российская Федерация, [3]АО «Государственное научно-производственное предприятие «Регион», Москва, Российская Федерация
[1]St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, Saint Petersburg, Russian Federation, [2]V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the RAS, Moscow, Russian Federation, [3]JSC State-Owned Research and Manufacturing Enterprise Region, Moscow, Russian Federation
**gnppregion@sovintel.ru*

Станислав В. Микони

Александр В. Полтавский

Сергей С. Семёнов

Резюме. Цель. *На основе ныне существующих привязных высотных платформ на базе мультикоптеров выбрать наиболее перспективный образец с точки зрения летных качеств. Летные качества оцениваются по сочетанию влияющих на них свойств платформы.* **Методы**. *Для достижения поставленной цели предлагается методология создания модели многомерного оценивания платформ.В ней применяются методы системного и функционального анализа свойств платформы, методы и модели теории отношений и измерения.* **Результаты**. *В качестве составляющих модели многомерного оценивания предложены модель предметной области и модель предпочтений лица, принимающего решение. Методология продемонстрирована на примере оценивания качества пяти экземпляров платформ.* **Заключение**. *Предлагаемый в статье подход позволяет использовать разработанную методологию для оценивания качества и технического уровня объектов любой природы. Методология может использоваться для получения комплексной оценки объекта по свойствам надежности и живучести.*

Abstract. Aim. *To select, out of the currently available tethered high-altitude multicopter-based platforms, the most promising one in terms of the flying characteristics. The latter are estimated based on the combination of the affecting properties of the platform.* **Methods.** *In order to achieve the specified goal, it is suggested using the methodology for developing the model of multidimensional estimation of a platform. It uses methods of system and function analysis of a platform's characteristics, methods and models of the theory of relations and measuring.* **Results.** *A problem domain model and decision-maker's preference model are suggested to be used as components of the multidimensional estimation model. The methodology is demonstrated using the case of quality estimation of five platforms.* **Conclusion.** *The approach proposed in the paper allows using the developed methodology for estimating the quality and engineering sophistication of items of any nature. The methodology can be used for comprehensive assessment of an item in terms of dependability and survivability.*

Ключевые слова: *привязная высотная платформа, свойства, многомерная оценка, модель, рейтинг.*
Keywords: *tethered high-altitude platform, characteristics, multidimensional estimate, model, rating.*

Для цитирования: *Микони С.В., Полтавский А.В., Семенов С.С. Методология проектирования модели многомерного оценивания привязных высотных платформ на базе мультикоптеров // Надежность. 2022. №2. С. 55-63. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-55-63*
For citation: *Mikoni S.V., Poltavsky A.V., Semionov S.S. Methodology for designing the model of multidimensional estimation of tethered high-altitude multicopter-based platforms. Dependability 2022;2:55-63. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-55-63*

Поступила *05.03.2022 г.* / **После доработки** *22.03.2022 г.* / **К печати** *17.06.2022 г.*
Received on: *05.03.2022* / **Revised on:** *22.03.2022* / **For printing:** *17.06.2022.*

Введение

В последнее десятилетие за рубежом существенно вырос интерес к мультикоптерам [1]. На их базе создаются робототехнические системы для решения разнообразных задач как в военной, так и в гражданской области. К таким задачам относятся: мониторинг окружающей среды, охрана, разведка, целеуказание, обнаружение и идентификация объектов в режиме реального времени, включая определение их точных координат и передачу данных на наземную станцию управления (НСУ), ретрансляция радиосигналов и т.д.

По сравнению с беспилотными летательными аппаратами (БЛА) с фиксированным крылом, у мультикоптеров имеется несколько преимуществ, к которым относятся вертикальный взлет и посадка, им не требуется посадочная полоса и навигационное оборудование. Наземное оборудование ограничено стартовой платформой. Мультикоптеры непрерывно сохраняют свое стационарное положение даже в условиях завихрения и быстрого порывистого ветра.

К мультикоптерам относятся летательные аппараты (ЛА), имеющие более трех несущих винтов [2]. Трехроторные мультикоптеры называют трикоптерами, четырехроторные – квадрокоптерами, пятироторные – пентакоптерами, шестироторные – гексакоптерами, а восьмироторные – октокоптерами. Они способны сохранять устойчивый полет при выходе из строя одного из роторов и обеспечивать мягкую посадку.

Наряду с мультикоптерами с дистанционным управлением и автономного действия возник и успешно развивается класс привязных, соединенных с наземным пунктом управления привязным кабелем-тросом, мультикоптеров в качестве высотных авиационных платформ различного назначения, например, в системах связи и управления [3–5]. Данное направление развития применения информационных систем, обладающих благодаря научно-техническому прогрессу в области радиоэлектроники малыми массогабаритными характеристиками и энергопотреблением, является весьма перспективным в связи получением нового свойства – высотности за счет размещения на БЛА [6].

Анализ конструкции, свойств и технических характеристик приведенных моделей привязных высотных платформ (ПВП) показал, что за основу конфигурации моделей взяты, в основном, квадрокоптеры и гексакоптеры, максимальная взлетная масса которых составляет 4–35 кг, максимальная масса полезной нагрузки – 2–25 кг, максимальная высота подъема – 40–200 м, продолжительность работы – 5–400 ч, допустимая скорость ветра не превышает 13 м/с.

1. Область применения

Анализ ПВП свидетельствует о повышенном интересе к этому виду ЛА, проявляемом во всех развитых странах мира. Применение ПВП целесообразно в тех случаях, когда не требуется большой радиус действия ЛА, но необходимо его длительное зависание на определенной высоте для выполнения задач видеосъемки, длительного наблюдения, ретрансляции радиосигналов, охраны или обороны с применением вооружения и др. [7].

К числу основных достоинств ПВП на мультикоптере является значительная (а порой и неограниченная, определяемая только ресурсами двигателей винтов) продолжительность полета, относительная скрытность применения, малое время развертывания, защищенность канала передачи данных.

2. Характеристика привязной высотной платформы

Разнообразие конструкций и применений высотных платформ требует систематизации их характеристик с целью создания новых конкурентоспособных образцов.

Рис. 1. Состав и схема применения привязного мультикоптера

Перечень характеристик, которые могут выступать в качестве оценочных показателей при проведении анализа, определяются задачами и целями исследования.

В состав ПВП на базе мультикоптера входят стартовая платформа, базовая станция, мультикоптер, полезная нагрузка (ПН), кабель-трос, наземный блок питания (рис. 1). Полезной нагрузкой в телекоммуникационных системах могут быть оптико-электронные приборы и разнообразное радиоэлектронное оборудование.

Мультикоптер непрерывно сохраняет свое стационарное положение даже в условиях турбулентности и быстрого порывистого ветра. Этот БЛА, снабженный ПН, связан с наземной станцией управления кабелем, выполняющим одновременно роль удерживающего троса, силового кабеля и коммуникационной линии.

Рис. 2. Квадрокоптер DJI «Matrice 300»

Рис. 3. Квадрокоптер DJI «Matrice 200/210»

Рис. 4. Квадрокоптер DJI «Matrice 600»

3. Постановка задачи

В качестве цели исследования поставим выбор наиболее предпочтительного образца ПВП из ныне существующих. Высотные платформы оцениваются только как носители радиоэлектронного оборудования без анализа их содержимого.

Наиболее предпочтительный образец ПВП определяется по результатам упорядочения существующих образцов ПВП. Образец ПВП, получивший наиболее высокую обобщенную оценку, представляет интерес с точки зрения сочетания значений характеризующих его показателей. Такое сочетание может быть принято за основу при выборе вариантов наиболее перспективных ПВП.

Для определения рейтинга существующих ПВП проектируется модель его многомерного оценивания (ММО) [8]. Эта модель состоит из двух частей: модели предметной области (ПрО) и модели предпочтений лица, принимающего решение (ЛПР).

4. Исходные данные для определения предпочтительной ПВП

Для проектирования модели предметной области воспользуемся имеющейся информацией о пяти экземплярах ПВП, охарактеризованных девятью показателями с известными значениями, представленными в табл. 1. Первые 4 экземпляра ПВП в табл. 1 изготовляются в Китае, а Геоскан 401 – в России.

Внешний облик пяти моделей привязных мультикоптеров приведен на рис. 2–6.

5. Анализ альтернатив

Для определения возможности оценивания ПВП, как альтернатив, воспользуемся постулатами системного анализа [9].

5.1. *Анализ на непротиворечивость.* Все представленные ПВП *непротиворечивы*, поскольку измеряются в одном пространстве показателей.

5.2. *Анализ на осуществимость и допустимость.* Все ПВП *доступны* для выбора, поскольку изготовляются по заказам.

Табл. 1. Характеристики ПВП

ПВП	Макс. высота подъема, м	Время полета, ч	Макс. допустим.скорость ветра, м/с	Макс. взлетная масса, кг	Макс. масса полезной нагрузки, кг	Длина, м	Ширина, м	Высота, м	Стоимость, млн. руб
«Matrice 300»	75	8	15	9,00	2,7	0,810	0,670	0,430	0,869
«Matrice 200/21»	75	6	12	6,14	1,5	0,887	0,880	0,378	0,432
«Matrice 600»	100	5	8	15,50	6,0	0,720	0,800	0,360	0,392
«Phantom 4/4 PRO»	60	2,5	10	1,39	0,3	0,247	0,247	0,196	0,105
«Геоскан 401»	100	72	10	9,50	2,0	1,560	1,560	0,560	1,650

Рис. 5. Квадрокоптер «Phantom 4/4 PRO»

Рис. 6. Квадрокоптер «Геоскан 401»

5.3. *Анализ на независимость*. Все представленные ПВП *независимы*, поскольку между ними отсутствуют отношения: «Общее-частное», «Целое-часть», «Цель-средство», «Причина-следствие». В частности, ни один ПВП не является частью другого и ни один не зависит от функционирования другого.

5.4. *Анализ на полноту и избыточность.* Список ПВП *не полон,* поскольку представлены только те платформы, для которых известны значения показателей. Список неизбыточен, поскольку отсутствуют ПВП с одинаковыми свойствами.

5.5. *Анализ на сопоставимость.* Альтернативы *сопоставимы* по j-му показателю, $j = \overline{1,n}$, если выполняются следующие условия:

1) имеется значение показателя для каждой альтернативы;

2) значения показателя измерены в единой шкале;

3) границы шкалы показателя соответствуют одному классу объектов.

Все ПВП отвечают первым двум условиям *сопоставимости*, так как все клетки таблицы заполнены, и каждый показатель измерен в единой для всех ПВП шкале.

Третье условие конкретизируется следующим утверждением.

Утверждение 1. Объект x со значением $y(x)$ j-го показателя, равным одной из границ выборочной шкалы $[y_{j,\min}, y_{j,\max}]$, относится по этому показателю к другому классу объектов, если ближайшее к нему значение $y(z)$ объекта z отличается от него не менее чем на половину шкалы.

Справедливость этого утверждения следует из фактического разделения объектом z исходной шкалы $[y_{j,\min}, y_{j,\max}]$ на две *соизмеримые* шкалы: $[y_{j,\min}, y(z))$ и $(y(z), y_{j,\max}]$. Удвоение шкалы со значениями всех объектов кроме объекта x с граничным значением j-го показателя фактически означает его принадлежность другому классу объектов, а сам j-й показатель играет роль классификатора объектов.

Объект x следует отнести по j-му показателю к старшему классу в том случае, когда $y(x) = y_{j,\max}$, что соответствует условию:

$$y_{j,\max} - y(z) \geq y(z) - y_{j,\min}.$$

Объект x следует отнести по j-му показателю к младшему классу в том случае, когда $y(x) = y_{j,\min}$, что соответствует условию:

$$y(z) - y_{j,\min} \geq y_{j,\max} - y(z).$$

Третьему условию сопоставимости не отвечают ПВП:

1) Геоскан – по показателю «Время полета» (в 11 раз превышает диапазон значений других ПВП) и по показателю «Стоимость»;

2) Phantom 4/4 PRO – по показателю «Взлетная масса»;

3) Matrice 600 – по показателю «Макс. масса полезной нагрузки».

Исходя из несопоставимости ПВП по указанным показателям, они должны быть выведены из общего состава ПВП; при этом на соответствующие показатели возлагается роль классификационных признаков. В частности, ПВП Phantom 4/4 PRO следует отнести к классу больших ПВП, а ПВП Matrice 600 – к классу малогабаритных ПВП.

6. Проектирование модели предметной области

Полнота состава показателей определяется относительно важнейших свойств, которыми он должен обладать. Для ПВП к таким свойствам относится *функциональность*, *устойчивость* позиционирования и *ресурсоемкость*.

Максимальная *высота подъема* и *время полета* отражают полетные характеристики ПВП. Как

носителя целевого оборудования, ПВП следует охарактеризовать *максимальной массой полезной нагрузки*. Три выделенных показателя характеризует назначение ПВП.

Максимальную допустимую скорость ветра следует принять за обобщающий показатель устойчивости ПВП к воздействиям среды. Он зависит от числа *винтов* геликоптера – чем больше винтов, тем больше устойчивость. На устойчивость ПВП влияет также его *масса* и геометрическая конфигурация.

С другой стороны, массогабаритные показатели характеризуют материальную ресурсоемкость ПВП. Один из показателей массы ПВП уже включен в группу функциональность. Взлетная масса обычно играет роль классификационного показателя, поскольку она влияет на область применения ПВП. Ресурсоемкость ПВП характеризует *относительная масса полезной нагрузки* как отношение массы полезной нагрузки к взлетной массе. Другим показателем, отражающим материальную ресурсоемкость ПВП, является отношение длины кабеля-троса к максимальной высоте подъема (полезная длина троса). Длина кабеля-троса в табл. 1 отсутствует.

Показателем энергетической ресурсоемкости ПВП является *потребляемая энергия* в кВт·ч. В табл. 1 этот показатель отсутствует. Учитывая тот факт, что стоимость играет роль денежного эквивалента свойств ПВП, экономические показатели выделяются в отдельную группу. Стоимость ПВП можно использовать либо в качестве ограничения, либо как частную цель в некоторой пропорции к общей характеристике объекта. При этом следует иметь в виду, что стоимость в рассматриваемом примере охватывает не все свойства ПВП. В частности, в табл. 1 отсутствуют показатели, характеризующие стартовую платформу.

Анализ показателей ПВП относительно таких обобщенных свойств, как *функциональность*, *устойчивость*, *ресурсоемкость*, *стоимость*, фактически свелся к их группировке, т.е. к построению дерева свойств. Состав показателей, включенных в табл. 1, можно считать полным относительно назначения и устойчивости ПВП и неполным по двум другим показателям. Это касается характеристики стартовой платформы и стоимости обслуживания ПВП. Включенные в табл. 1 показатели позволяют судить о летных качествах ПВП как носителя спецоборудования.

Количественные значения показателей в табл. 1 ориентируют на применение многоцелевой оптимизации для получения линейного порядка объектов. Ограниченность числа ПВП пятью экземплярами не позволяет применить корреляционный анализ для установления независимости показателей табл. 1, что заставляет ограничиться логическим анализом их взаимосвязи.

Наиболее очевидна взаимозависимость показателей массы. Она уменьшается включением относительной массы полезной нагрузки в состав показателей ресурсоемкости и исключением взлетной массы из состава критериев. Имеет место также взаимозависимость между габаритными показателями платформы. Ее уменьшению способствует замена длины и ширины платформы ее диагональю.

Результирующее дерево оцениваемых показателей ПВП изображено на рис. 7. Оно отличается от дерева целей отсутствием требований к значениям показателей.

Добавлением к каждому показателю «Наиболее предпочтительное значение» осуществляется переход от дерева свойств к дереву целей ПВП. Это очевидное пожелание конкретизируется в модели предпочтений ЛПР путем задания целевых значений измеряемых показателей ПВП.

Рис. 7. Дерево оцениваемых показателей ПВП

7. Проектирование модели предпочтений ЛПР

7.1. *Важность показателей*

Из двух способов задания важности показателей (в относительных и абсолютных оценках) применим задание абсолютных оценок в баллах [8]. На рис. 7 у вершин каждого уровня дерева проставлены экспертные оценки важности показателей в десятибалльной шкале 1, 2, …, 10.

Балльные оценки переводятся в относительные оценки делением каждой оценки на их сумму по формуле [9]:

$$w_j = \frac{b_j}{\sum_{j=1}^{n} b_j}.$$

В группе *Функциональность* вектору балльных оценок (10, 6, 8) соответствует вектор весов $\mathbf{w}_ф$ = (10/24; 6/24; 8/24) = (0,42; 0,25; 0,33).

В группе *Габариты* вектору балльных оценок (6, 6) соответствует вектор весов $\mathbf{w}_г$ = (0,5; 0,5). В группе *Ресурсы* соотношению Масса/Габариты (8, 6) соответствует вектор весов $\mathbf{w}_р$ = (8/14; 6/14) = (0,57; 0,43). Группы *Устойчивость* и *Стоимость* включают по одному показателю.

В группе *Характеристика* вектору балльных оценок (10, 8, 8) соответствует вектор весов $\mathbf{w}_х$ = (10/26; 8/26; 8/26) = (0,38; 0,31; 0,31).

Соотношение важности группы *Характеристика ПВП (МК)* определяется отношением суммы 10 + 8 + 8 к пяти баллам группы *Стоимость* и составляет 26/31 ≅ 0,8 и 5/26 ≅ 0,2.

7.2. *Предпочтения превосходства на шкалах показателей*

В отсутствие обоснованных нормативов (реальных целей) показателей, им задаются идеальные цели на границах шкал. К значениям показателей, отражающих потребительские свойства объекта, обычно предъявляется требование максимизации. Оно применимо к пяти верхним первичным показателям на рис. 7.

К значениям ресурсных показателей обычно предъявляется требование минимизации. В данной задаче это касается габаритов ПВП. В том случае, когда стоимость включается в общую оценку объекта, к ней также предъявляется требование минимизации. Предъявленные требования к значениям показателей означает применение целевых критериев типа $y \to \max$ (min). Если ЛПР имеет ограничение на стоимость ПВП, задается ограничительный критерий, например, $y_{ст} \le 0{,}5$ млн руб. В этом случае первый и последний ПВП в табл. 1 выпадают из оценивания.

Более мягкий вариант оценивания заключается в применении убывающей логистической функции к показателю стоимости с точкой перегиба 0,5 млн руб. В интервале $[y_{ст,min}, 0{,}5)$ эта функция отражает склонность, а в интервале $(0{,}5, y_{ст,max}]$ несклонность ЛПР к риску (рис. 8).

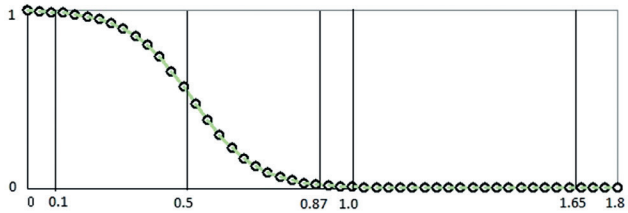


Рис. 8. Логистическая функция ценности показателя «Стоимость ПВП»

На рис. 8 наглядно подтверждается факт превышения длины интервала [0,87; 1,65] над интервалом [0,1; 0,87], что означает удвоение шкалы стоимости. А это наглядно показывает несопоставимость ПВП «Геоскан 401» по стоимости (1,65 млн руб) с другими платформами, стоимость которых ограничена диапазоном [0,1; 0,87] млн руб.

7.3. *Задание границ шкал показателей*

По результатам анализа на сопоставимость пять ПВП из табл. 1 разбито на 3 группы. ПВП «Phantom 4/4 PRO» по показателю «Взлетная масса» отнесена к классу «Малые ПВП». ПВП «Геоскан 401» по показателю «Время полета» отнесена к классу «Большие ПВП», а 3 ПВП «Matrice» отнесены к классу «Средние ПВП». Для исключения нулевых оценок в классе «Средние ПВП» при применении мультипликативной обобщающей функции на 10% раздвигаются границы выборочных шкал показателя, снизу – при максимизации, сверху – при минимизации показателя (табл. 2).

В том случае, когда не заданы границы классов, они вычисляются относительно центра сгустка значений каждого показателя. Если класс включает только одного представителя, для выравнивания шкал классов

Табл. 2. Показатели класса «Средние ПВП»

ПВП	Макс. высота подъема, м	Время полета, ч	Макс. масса полезной нагрузки, кг	Макс. допустим. скорость ветра, м/с	Относит. масса полезной нагрузки, кг	Диагональ м^2	Высота, м	Стоимость, млн. руб
«Matrice 300»	75	8	2,7	15	0,30	1,05	0,430	0,869
«Matrice 200/21»	75	6	1,5	12	0,24	1,25	0,378	0,432
«Matrice 600»	100	5	6,0	8	0,39	1,08	0,360	0,392
$y_{min} - 0{,}1 \times y_{min}$	65	4,2	2,1	6,5	0	0,93	0,317	0,300
$y_{max} + 0{,}1 \times y_{max}$	110	8,8	6,6	16,5	1	1,37	0,473	0,950

Табл. 3. Показатели класса «Малые ПВП»

ПВП	Макс. высота подъема, м	Время полета, ч	Макс. масса полезной нагрузки, кг	Макс. допустим. скорость ветра, м/с	Относит. масса полезной нагрузки, кг	Диагональ м^2	Высота, м	Стоимость, млн. руб
«Phantom 4/4 PRO»	60	2,5	0,3	10	0,18	0,35	0,196	0,105
y_{min}– 0,5×y_{min}	30	1,25	0,15	5	0	0,18	0,176	0,095
y_{max} + 0,5×y_{max}	90	3,75	0,45	15	1	0,53	0,21	0,115

Табл. 4. Показатели класса «Большие ПВП»

ПВП	Макс. высота подъема, м	Время полета, ч	Макс. масса полезной нагрузки, кг	Макс. допустим. скорость ветра, м/с	Относит. масса полезной нагрузки, кг	Диагональ м^2	Высота, м	Стоимость, млн. руб
«Геоскан 401»	100	72	2,0	10	0,21	2,21	0,56	1,650
y_{min}– 0,5×y_{min}	50	36	1,0	5	0	1,10	0,28	0,825
y_{max}+ 0,5×y_{max}	150	108	3,0	15	1	3,31	0,84	2,475

Табл. 5. Рейтинг средних ПВП

Средние ПВП	Хар-ка ПВП	Ранг	Стоимость	Ранг	Общ.оценка	Ранг
«Matrice 600» (Китай)	0,435	2	0,858	1	0,52	**1**
«Matrice 200/21» (Китай)	0,374	3	0,797	2	0,46	**2**
«Matrice 300» (Китай)	0,484	1	0,125	3	0,41	**3**

его значение принимается за центр сгустка, а нижняя и верхняя границы класса откладываются на 50% от этого значения показателя: $y \pm 50\%$ (табл. 3 и 4). Это относится к классам «Малые ПВП» и «Большие ПВП».

При равенстве отрезков шкал, оценки, вычисляемые для представителей разных классов, сопоставимы.

7.4. *Согласование частных оценок показателей*

Согласование частных оценок показателей ПВП осуществляется с применением обобщающих функций (ОФ). В качестве таковых для получения линейного порядка ПВП по выбранным показателям применим аддитивную (АОФ) и мультипликативную (МОФ) средневзвешенные обобщающие функции.

Аддитивная обобщающая функции имеет вид:

$$y_{АОФ}(x_i) = \sum_{j=1}^{n} w_j y_j(x_i). \quad (1)$$

Мультипликативная обобщающая функции имеет вид:

$$y_{МОФ}(x_i) = \prod_{j=1}^{n} y_j(x_i)^{w_j}. \quad (2)$$

В этих формулах y_j – значение j-го показателя, а w_j – его относительная важность (вес). Веса показателей, выраженные в долях единицы, подчиняются требованию:

$$\sum_{j=1}^{n} w_j = 1.$$

Как следует из формул (1) и (2), обобщенная оценка i-го БЛА зависит от значения y_j j-го показателя, его важности (веса) w_j, количества показателей n и вида обобщающей функции. В свою очередь, значение y_j j-го показателя зависит от выбранной шкалы. Учитывая разнородность шкал показателей, для вычисления многокритериальных оценок их значения приводятся к абсолютной шкале [0, 1] путем нормирования шкалой [$y_{j,min}$, $y_{j,max}$]. На экспертное назначение важности показателей влияет их структура.

Рассмотрим различные варианты упорядочения на основе разработанной модели многомерного оценивания ПВП с применением методов достижения цели и многомерной полезности.

8. Расчет рейтинга сопоставимых привязных высотных платформ

Для создания моделей ПрО и предпочтений ЛПР и вычисления на их основе обобщенных оценок всех пяти ПВП и рейтинга средних ПВП была использована информационно-аналитическая система «СВИРЬ» [9].

8.1. ***Рейтинг средних ПВП***

Рейтинг средних ПВП, полученный с применением АОФ, приведен в табл. 5. По совокупности значений показателей предпочтение отдается ПВП «Matrice 300». Однако с учетом дороговизны (3-е место по стоимости) эта платформа заняла последнее место. Общее первое место заняла платформа «Matrice 600», по характеристике занявшая второе место.

Общие оценки, рассчитанные с применением МОФ, имеют несущественное различие (0,50; 0,43; 0,37).

8.2. ***Оценка малой ПВП***

Оценка малой платформы, полученная с применением АОФ, приведена в табл. 6.

Табл. 6. Оценка малой ПВП

Малая ПВП	Характеристика ПВП	Стоимость	Оценка
«Phantom 4/4 PRO»	0,418	0,5	0,43

8.3. ***Оценка большой ПВП***

Оценка большой платформы приведена в табл. 7.

Табл. 7. Оценка большой ПВП

Большая ПВП	Характеристика ПВП	Стоимость	Оценка
«Геоскан 401»	0,449	0,5	0,46

Оценки характеристики и стоимости малой и большой платформы равноценны с учетом выбранной важности этих обобщенных показателей. А общие оценки соизмеримы с общими оценками средних ПВП.

Заключение

В образном выражении формирование облика (лица) будущего объекта представляет собой нахождение нужных пропорций между характеризующими его факторами. В роли факторов технического изделия выступают показатели, отражающие его назначение и функционирование. Для оценивания вариантов ПВП как носителя оптико-электронных и радиоэлектронных приборов, предложено использовать 7 технических показателей и стоимость.

Стоимость выделена в качестве отдельного показателя. Это дает возможность раздельного оценивания ПВП по техническим характеристикам и стоимости. В идеале стоимость является денежным эквивалентом качества ПВП. С другой стороны, в отношении принятых показателей она не полностью отражает техническую характеристику ПВП и может использоваться как в виде ограничения, так и в составе показателей.

Важную роль в оценивании качества и технического уровня ПВП играет их сопоставимость. При значительном расхождении значений показателей следует относить соответствующие ПВП к разным классам. При надлежащем формировании шкал показателей обеспечивается сопоставимость оценок ПВП, что важно при наличии единственного представителя класса. Предложенная методология оценивания качества и технического уровня ПВП продемонстрирована на примере пяти платформ с известными значениями выбранных показателей. Предложенный подход применим и для оценивания качества ПВП с комплексной оценкой показателей надежности.

Библиографический список

1. Полтавский А.В., Семенов С.С., Бурба А.А. и др. Информационные процессы в технике: моделирование систем и объектов многофункциональных робототехнических комплексов беспилотной авиации / Под ред. д-ра техн. наук, проф. В.М. Вишневского, ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН. – Королев: Изд. центр АО «ПСТМ», 2019. 408 с.

2. Свердлов С.З. О компоновке многороторного беспилотного вертолета (мультикоптера) // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. 2018. № 2 (2). С. 20-24.

3. Вишневский В.М., Терещенко Б.Н. Разработка и исследование нового поколения высотных привязных телекоммуникационных платформ // T-Comm. 2013. № 7. С. 20-24.

4. Полтавский А.В., Юрков Н.К., Нгуен Зуи Фыонг. Телекоммуникация сетевых систем на основе высотных платформ // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 1 (21). С. 46-55.

5. Полтавский А.В. Телекоммуникация систем связи и управления на платформах беспилотных воздушных судов // Научный Вестник МГТУ ГА. 2021. Т. 24. № 2. С. 58-69.

6. Фетисов В.С., Кулбаев Б.Р. Содержание и развитие концепции «Привязанный беспилотный летательный аппарат» // Альманах современной науки и образования. 2014. № 3 (82). С. 170-173.

7. Полтавский А.В., Семенов С.С., Русяева Е.Ю. Привязные высотные телекоммуникационные платформы на базе беспилотных летательных аппаратов – аэростатов и мультикоптеров // Боеприпасы. 2021. № 2. С. 58-69.

8. Микони С.В., Семенов С.С. Оценивание рейтинга разведывательно-ударных и ударных беспилотных летательных аппаратов // Полет. 2021. № 6. С. 28-40.

9. Микони С.В. Теория принятия управленческих решений. СПб.: Лань, 2015. 448 с.

10. ИС СВИРЬ [Электронный ресурс]. URL: http://www.mcd-svir.ru. Дата обращения: 03.03.2022.

References

1. Poltavsky A.V., Semionov S.S., Burba A.A. et al. Vishnevsky V.M., Doctor of Engineering, Professor, Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, editor. [Information processes in technology: simulation of systems and facilities of multifunctional robotics systems in unmanned aviation]. Korolyov: Izdatelsky tsentr AO PSTM; 2019. (in Russ.)

2. Sverdlov S.Z. On layout design of multirotor unmanned helicopter (multicopter). *Bulletin of Vologda State University. Series Technical Sciences* 2018;2(2):20-24. (in Russ.)

3. Vishnevsky V.M., Tereshchenko B.N. Research and development of new generation of telecommunication tethered high altitude platforms. *T-Comm* 2013;7:20-24.(in Russ.)

4. Poltavskiy A.V., Yurkov N.K., Nguen Z.F. Telecommunications network systems on the basis of high-altitude platforms. *Reliability and Quality of Complex Systems* 2018;1(21):46-55. (in Russ.)

5. Poltavsky A.V. Telecommunication of communication and control systems on unmanned aerial vehicles platforms. *Civil Aviation High Technologies* 2021;24(2):58-69. (in Russ.)

6. Fetisov V.S., Kulbaev B.R. Content and development of "Tethered unmanned aerial vehicle" conception. *Almanakh sovremennoy nauki i obrazovaniya* 2014;3(82):170-173. (in Russ.)

7. Poltavsky A.V., Semenov S.S., Rusiaeva E.Yu. [Tethered high-altitude telecommunication platforms based on unmanned aerial vehicles, blimps and milticopters]. *Boepripasy* 2021;2:58-69. (in Russ.)

8. Mikoni S.V., Semyonov S.S. Rating Assessment of Reconnaissance-Strike and Strike Unmanned Aerial Vehicles. *Polyot* 2021;6:28-40. (in Russ.)

9. Mikoni S.V. [Theory of managerial decision-making]. Saint-Petersburg: Lan; 2015. (in Russ.)

10. [IS SVIR]. [accessed: 03.03.2022]. Available at: http://www.mcd-svir.ru. (in Russ.)

Сведения об авторах

Микони Станислав Витальевич – доктор технических наук, профессор, член Российской ассоциации искусственного интеллекта, ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук (СПб ФИЦ РАН). Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской Академии Наук (СПИИРАН). Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: smikoni@mail.ru

Полтавский Александр Васильевич – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва, Российская Федерация, e-mail: lab-54@bk.ru

Семёнов Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, руководитель группы анализа и перспективного проектирования, АО «Государственное научно-производственное предприятие «Регион», Москва, Российская Федерация, e-mail: gnppregion@sovintel.ru

About the authors

Stanislav V. Mikoni, Doctor of Engineering, Professor, Member of the Russian Association of Artificial Intelligence, Lead Researcher, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences. Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: smikoni@mail.ru.

Alexander V. Poltavsky, Doctor of Engineering, Lead Researcher, V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, Moscow, e-mail: lab-54@bk.ru

Sergey S. Semionov, Candidate of Engineering, Head of Group for Analysis and Advanced Engineering, State Research and Development Company Region, Moscow, Federation Moscow, e-mail: gnppregion@sovintel.ru.

Вклад авторов в статью

Микони С.В. Постановка задачи, проектирование модели предметной области, расчет рейтинга сопоставимых привязных высотных платформ, заключение.

Полтавский А.В. Постановка задачи, проектирование модели предметной области, заключение

Семенов С.С. Постановка задачи, характеристика привязной высотной платформы, исходные данные, проектирование модели предпочтений.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Исследования, выполненные по данной тематике, проводились в рамках бюджетной темы FFZF–2022–0004.

Оригинальная статья / Original article
https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-64-71

Оценка характеристик импульсного сигнала при передаче по цепям с распределенными и сосредоточенными параметрами

Evaluating the properties of impulse signals transmitted over circuits with distributed and lumped parameters

Владимир П. Батраев[1], Владимир В. Батраев[1]*
Vladimir P. Batraev[1], Vladimir V. Batraev[1]*
[1]Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»), Москва, Российская Федерация
[1]Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation (JSC NIIAS), Moscow, Russian Federation
**exartus@mail.ru*

Владимир П. Батраев

Владимир В. Батраев

Резюме. *Надежность железнодорожной системы автоблокировки АБТЦ-МШ всецело зависит от функциональной безопасности и устойчивости работы составляющих ее устройств, большинство из которых работает в импульсном режиме. Одними из основных компонентов устройств импульсного преобразования сигналов являются разнообразные трансформаторы и дроссели, расчет и разработка которых на практике часто затруднены в силу недостаточного учета паразитных параметров и особенностей работы этих электромагнитных систем при подмагничивании сердечника. В статье даны оценки результатов согласования электрических характеристик трансформатора с импедансами нагрузки и источника импульсного сигнала, пригодные для анализа и построения формирующих цепей и линий задержки на базе элементов с сосредоточенными параметрами.* **Цель.** *Целью работы является обоснование инженерной методики расчета длительности переднего фронта сигнала в процессе установления его уровня на выходе формирующей цепи импульсного трансформатора при согласовании с нагрузками и оценка времени задержки включения исполнительного устройства при заданном пороге срабатывания в зависимости от параметров цепи второго порядка, которая часто используется в качестве элемента обратной связи импульсных преобразователей и систем авторегулирования.* **Методы.** *Временные характеристики и форма импульса определяются для трансформатора, схема замещения которого соответствует работе изделия в диапазоне высших частот и учитывает приведенные к первичной обмотке паразитные параметры. Функция сигнала на выходе описывается согласно правилам теории линейных электрических цепей в операторной форме и после последовательно выполненных преобразований Лапласа обобщенное выражение коэффициента передачи сводится к стандартному изображению для цепи второго порядка. Аналитическое решение найдено через определение значений нулей и полюсов функции на комплексной плоскости, как корней квадратного уравнения, выраженных через коэффициент затухания цепи. Приводятся графики поля зависимостей процессов установления амплитуды импульса на выходе формирующей цепи и долей выброса амплитуды от коэффициента затухания при различных соотношениях коэффициентов согласования волнового сопротивления трансформатора с импедансами нагрузки и источника импульсного сигнала. Точечные оценки длительности фронта импульса выполнены с помощью функции программирования Mathcad и с учетом размерности матриц типа TRUE/FALSE, отражающих переход от нуля к единице. Это позволяет предложить линейные аппроксимации зависимостей длительности на заданном интервале с одной точкой перегиба, соответствующей условию полного согласования всех сопротивлений. Приводятся сведения по отклонению аппроксимации от расчетных данных, задержки срабатывания исполнительного устройства по порогу и обсуждение допустимости представления распределенных параметров в виде сосредоточенных элементов при реализации искусственных линий задержки и цепей более высокого порядка.* **Результаты. Выводы**. *Поставленная цель достигается формированием однозначной расчетной зависимости, связывающей длительность фронта сигнала с коэффициентом передачи исследуемой цепи второго порядка. Обоснованность метода получения зависимости основывается на представлении описания выходного сигнала импульсного трансформатора в общем виде, последующем анализе выражения и получением точного аналитического решения с учетом принятых к рассмотрению основных паразитных параметров трансформатора и величин нагрузки.*

Abstract. *The dependability of the ABTC-MSh automatic block system entirely depends on the functional safety and operational stability of its component devices, most of which operate in pulse mode. One of the key components of pulse signal converters is various transformers and chokes,*

whose calculation and development is, in practice, often difficult due to insufficient consideration of stray parameters and operational specificity of such electromagnetic systems when the core is magnetized. The paper estimates the results of coordination of the transformer's electrical characteristics with the load impedance and that of the pulse signal source suitable for analysing and constructing signal-shaping networks and delay lines based on lumped elements. **Aim.** *The aim of the work is to substantiate an engineering technique for calculating the duration of the leading edge of a signal in the process of setting its level at the output of the forming circuit of a pulse transformer when matching with loads and estimating the delay time for switching on the actuator at a given response threshold, depending on the parameters of the second-order circuit, which is often used as a feedback element of pulse converters and auto-regulation systems.* **Methods.** *The time characteristics and pulse form are determined for a transformer whose equivalent circuit corresponds to the item's operation in high frequencies and takes into account the stray parameters normalized to to the primary side. The output signal function is described in accordance with the linear electric circuit theory in operator form and, after a series of Laplace transformations, the generalized expression of the transmission factor is reduced to a standard form for a second-order circuit. The analytical solution was found by determining the values of the zeros and poles of the function on the plane of complex numbers as roots of quadratic equations expressed in terms of the coefficient of circuit damping. Graphs of the field dependences of the processes of establishing the pulse amplitude at the output of the forming circuit and the proportions of the amplitude outlier on the attenuation coefficient are given for various ratios of the coefficients of matching the transformer wave resistance with the load impedances and the pulse signal source. Point estimates of the pulse edge duration are made using the Mathcad programming function and taking into account the dimension of TRUE/FALSE matrices that reflect the transition from zero to one. This allows proposing linear approximations of the duration dependences within the given interval with a single inflection point that corresponds to the condition of complete matching of all resistances. Information is provided on the deviation of the approximation from the calculated data, the delay time of the actuator by the threshold. It is also discussed whether it is admissible to represent distributed parameters in the form of lumped elements while implementing artificial delay lines and higher-order circuits.* **Results. Conclusions.** *The specified problem is resolved by defining a unique calculated dependence that associates the signal edge duration to the transmission coefficient of the examined second-order circuit. The validity of the method for dependence deduction is based on describing the output signal of a pulse transformer in a general form, subsequent analysis of the expression and deduction of an accurate analytical solution, taking into account the primary stray parameters of the transformer and load values.*

Ключевые слова: *переходный процесс, импульсный сигнал, расчет трансформатора, цепи согласования, инженерная методика.*
Keywords: *transient process, impulse signal, transformer design, matching network, engineering practice.*

Для цитирования: *Батраев В.П., Батраев В.В. Оценка характеристик импульсного сигнала при передаче по цепям с распределенными и сосредоточенными параметрами // Надежность. 2022. №2. С. 64-71. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-64-71*
For citation: *Batraev V.P., Batraev V.V. Evaluating the properties of impulse signals transmitted over circuits with distributed and lumped parameters. Dependability 2022;2: 64-71. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2022-22-2-64-71*

Поступила *08.02.2022 г.* / **После доработки** *28.03.2022 г.* / **К печати** *17.06.2022 г.*
Received on: *08.02.2022* / **Revised on:** *28.03.2022* / **For printing:** *17.06.2022.*

Введение

Одними из основных компонентов тракта приема локомотивных сигналов являются разнообразные трансформаторы и дроссели, расчет и разработка которых на практике часто затруднены в силу недостаточного учета паразитных параметров и особенностей работы этих электромагнитных систем при несимметричном подмагничивании сердечника. Как следствие, возникают трудности по обеспечению стабильных временных и амплитудных характеристик импульсов, согласованию составных частей и узлов устройства при изменении характера и величины нагрузок, доли нелинейных искажений сигналов в диапазоне рабочих частот и уровню помехоэмиссии за его пределами, температурному режиму и т.д. В качестве примера на рис. 1 представлена осциллограмма выходного импульса трансформатора обратноходового преобразователя с характерными искажениями, которые обусловлены некоторыми из перечисленных выше причин.

Обзор источников

Известен ряд публикаций по данной тематике [1–6], в том числе рекомендации по учету влияния

Рис. 1. Искажения импульса обратноходового преобразователя

изменяющихся параметров импульсных преобразователей и трансформаторов [7–9], методам их машинного и аналитического расчета [10–13]. На практике же конечный результат часто достигается в ходе итерационного цикла, что занимает большое количество времени, а полученное решение может не только иметь существенную погрешность, но и может быть несостоятельным в случае изменения условий работы проектируемого оборудования. Данное обстоятельство характеризует как актуальность затронутой темы, так и целесообразность разработки методик для инженерных расчетов импульсных трансформаторов и дросселей на основе сознательно вводимых, но теоретически обоснованных критериев и ограничений.

Методика

Временные характеристики и форму импульса удобно определить на основании анализа эквивалентной схемы электромагнитной системы в соответствии с исследуемым частотным диапазоном работы изделия. Известные схемы замещения трансформатора представлены на рис. 2, где Z_i, $Z'_{\text{Н}}$ – внутреннее сопротивление источника ЭДС и приведенное к первичной обмотке сопротивление нагрузки, r_1, L_1 – активное сопротивление и индуктивность первичной обмотки, $r_{\text{П}}$ – сопротивление потерь изоляции и сердечника, r'_2, L_S, C'_0 – приведенные к первичной обмотке активное сопротивление, индуктивность рассеяния, собственная емкость трансформатора и емкость нагрузки [1].

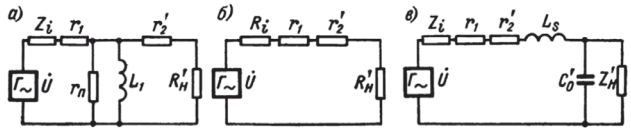


Рис. 2. Схемы замещения трансформатора для различных участков частотного диапазона:
а) – для нижних частот; б) – для средних частот;
в) – для высоких частот.

Учет потерь в результате магнитных процессов в сердечнике требует отдельного рассмотрения и на данном этапе анализ характеристик импульса выполним только по электрическим параметрам цепи второго порядка (рис. 2в), функция передачи которой в операторной форме будет иметь вид [14, 15]

$$\frac{U_2(p)}{U_1(p)} = \left(p^2 \cdot L_S \cdot C'_0 + p \cdot \left(Z_{\text{г}} \cdot C'_0 + \frac{L_S}{Z'_{\text{Н}}} \right) + \frac{Z_{\text{г}}}{Z'_{\text{Н}}} + 1 \right)^{-1},$$

где $Z_{\text{г}} = Z_i + r_1 + r'_2$ – общий импеданс со стороны источника, как генератора сигнала.

Решение найдем через определение значения нулей и полюсов функции, как корней квадратного уравнения, определяющих характер переходного процесса.

$$p^2 A + pB + C = 0. \quad (1)$$

Если выполнить замену переменной согласно теореме подобия преобразований Лапласа,

$$F(q) = F(pb) = \frac{1}{b} F\left(\frac{t}{b}\right) \text{ при } b = \sqrt{A/C},$$

то обобщенное выражение функции передачи при воздействующем сигнале может быть сведено к стандартному изображению:

$$\frac{U_2(q)}{U_1(q)} = \left[C \cdot \left(q^2 + 2 \cdot q \cdot a + 1 \right) \right]^{-1}, \quad (2)$$

где $a = B \cdot (2 \cdot \sqrt{AC})^{-1}$ – коэффициент затухания переходного процесса;

$T = t \cdot \sqrt{C/A}$ – новая переменная во временной области.

Задав входное воздействие в виде ступенчатой ЭДС и проведя соответствующие преобразования, получим следующее изображение функции выходного напряжения:

$$U_2(q) = \left[q_0 (q - q_1)(q - q_2) \right]^{-1}.$$

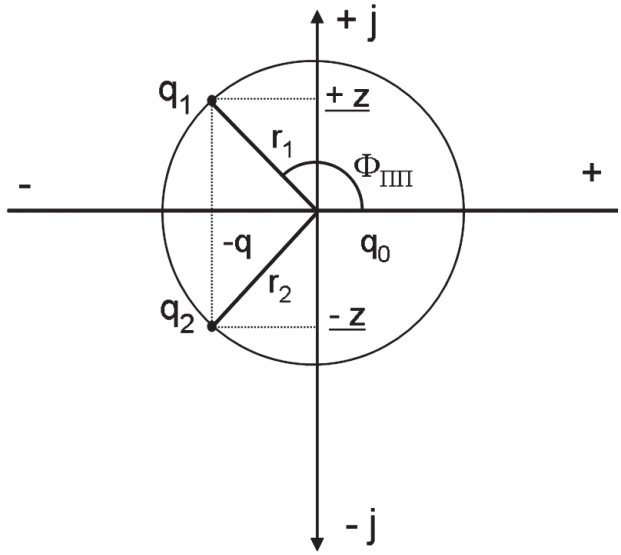


Рис. 3. Годограф функции на комплексной плоскости при $a < 1$

Нулей у данной функции нет, а полюсами являются корни уравнения:

$$q_0=0;\ q_{1;2}=-a\pm\sqrt{a^2-1}.$$

При $a<1$ положение полюсов на комплексной плоскости соответствует рис. 3, а оригинал отображает колебательный процесс, который затухает по экспоненте [15]

$$U_2(T)=1+\frac{e^{-aT}}{z\cdot r}\mathrm{Sin}(zT-\Phi_{\text{пп}}),$$

где $q_{1;2}=-a\pm \mathrm{j}\,z$ – комплексно-сопряженные корни при $z=\sqrt{1-a^2}$;

$r=r_1^2$ – произведение расстояний от полюса q_0 до полюса q_1 и обратно.

Используя формулы приведения, сложения и преобразования тригонометрических функций, получим

$$\mathrm{Sin}\ (zT-\Phi_{\text{пп}})=-\left(\frac{a}{r_1}\mathrm{Sin}\ zT+\frac{z}{r_1}\mathrm{Cos}\ zT\right),$$

а учитывая, что радиус r_1=1, окончательно имеем

$$U_2(T)=1-e^{-aT}\left(\frac{a}{\sqrt{1-a^2}}Sin\sqrt{1-a^2}T+Cos\sqrt{1-a^2}T\right). \quad (3)$$

При $a>1$ положение полюсов на комплексной плоскости соответствует рис. 4, а оригинал отображает апериодический затухающий процесс

$$U_2(T)=1+\frac{e^{q_1T}}{(r_{01})\cdot(-r_{21})}+\frac{e^{q_2T}}{(r_{02})\cdot(r_{12})},$$

где $q_{1;2}=-a\pm z$ – действительные корни при $z=\sqrt{a^2-1}$;

$(r_{ik})\cdot(r_{jk})$ – произведение расстояний от каждого i- и j-полюса до исследуемого k-полюса, причем $(r_{01})\cdot(r_{-21})=q_1\cdot(q_1-q_2)$; $(r_{02})\cdot(r_{12})=q_2\cdot(q_2-q_1)$.

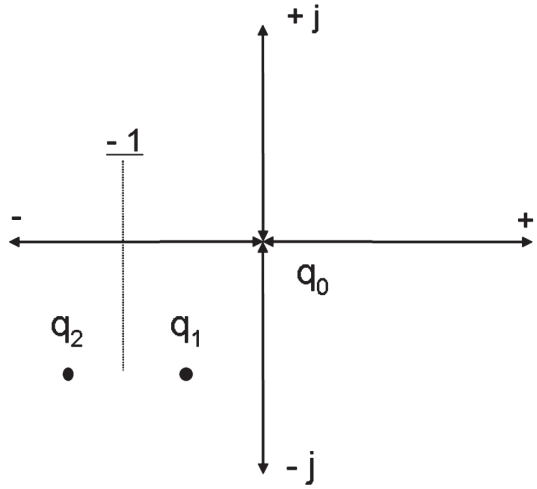


Рис. 4. Положение полюсов при $a>1$

Используя свойства гиперболических функций, после преобразований получим:

$$U_2(T)=1-e^{-aT}\left(\frac{a}{\sqrt{a^2-1}}\mathrm{Sh}\sqrt{a^2-1}\ \cdot T+\mathrm{Ch}\sqrt{a^2-1}\cdot T\right) \quad (4)$$

Следует отметить, что поскольку формулы (3) и (4) описывают один и тот же процесс, то они применимы для любых значений коэффициента затухания, но наиболее простые вычисления могут быть получены при указанных выше ограничениях.

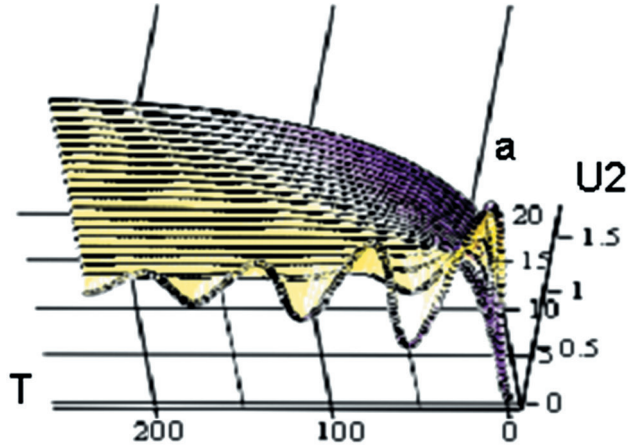


Рис. 5. Поле зависимостей процессов установления амплитуды импульса

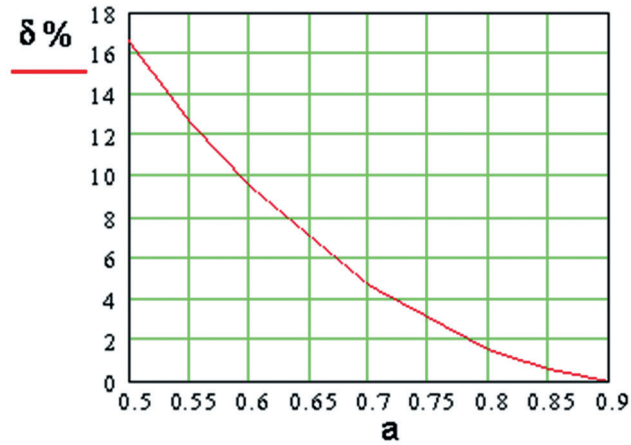


Рис. 6. Выброс амплитуды импульса от величины коэффициента затухания

Решения являются точными для любых цепей второго порядка с сосредоточенными параметрами, на величины которых никакие ограничения не были наложены. Это позволяет распространить полученные результаты и на анализ переходных процессов при передаче импульсов по элементам *искусственных формирующих цепей* и *линий задержки*, для которых еще допустимо представление распределенных параметров в виде сосредоточенных [15, 16]. На рис. 5 и рис. 6 приведены графики поля зависимостей установления амплитуды импульса и величины выброса амплитуды.

Очевидно, что цепи более высокого порядка могут иметь и более сложный колебательный процесс за время установления амплитуды импульса. Качественный анализ цепи третьего порядка показал [17] наличие дополнительного колебания по переднему фронту им-

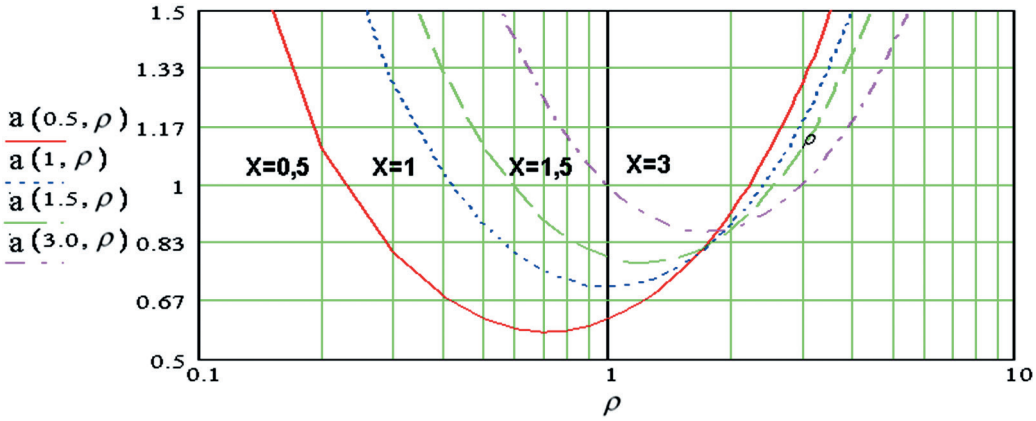


Рис. 7. Зависимость коэффициента затухания от соотношений импедансов схемы

пульса, однако полученные трансцендентные уравнения исключили возможность установления однозначных зависимостей частоты, уровня и характера изменения процесса от соотношения параметров элементов цепи. Тем не менее, критической точкой возможности возникновения колебательного режима в цепи третьего порядка предлагается считать величину выброса до 4% при предельном значении 10–15% , обычно допускаемых при построении импульсных преобразователей и систем авторегулирования с цепями второго порядка в качестве элементов обратной связи.

Оценку влияния степени согласования импедансов генератора, волнового сопротивления цепи и нагрузки на величину коэффициента затухания выполним подстановкой в (2) значений коэффициентов *A*, *B*, *C* из выражения (1):

$$a = \frac{0,5}{\sqrt{1+x}} \cdot \left(\rho + \frac{x}{\rho}\right), \qquad (5)$$

где $x=Z_г/Z_H$; $\rho=Z_B/Z_H$ – коэффициенты согласования.

График зависимости приведен на рис. 7.

В сравнении с графиком рис. 6 можно видеть, что даже при полном согласовании $x=\rho=1$ выброс амплитуды имеет место, а его величина не менее 4,5%. Как следует из (5), например, для любого сочетания волнового сопротивления цепи и нагрузки $\rho>0$ существует строго определенное значение импеданса генератора сигнала, при котором величина выброса может быть минимизирована

$T_{21} - T_3 = 1.8$

Q =

	0	1	2	3	4	5	6	7
0	1	1	1	1	0	0	0	0
1	1	1	1	1	0	0	0	0
2	1	1	1	1	0	0	0	0
3	1	1	1	1	1	0	0	0
4	1	1	1	1	1	0	0	0
5	1	1	1	1	1	0	0	0
6	1	1	1	1	1	0	0	0
7	1	1	1	1	1	0	0	0
8	1	1	1	1	1	1	0	0

$a_2 = 0.5$

G =

	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

M =

	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
0	1.258	1.331	1.399	1.462	1.52	1.57	1.615	1.652	1.682	1.705	1.72
1	1.019	1.071	1.12	1.165	1.205	1.241	1.273	1.3	1.323	1.342	1.355
2	0.849	0.89	0.928	0.963	0.994	1.023	1.049	1.072	1.092	1.11	1.124
3	0.726	0.759	0.79	0.819	0.846	0.871	0.893	0.914	0.933	0.95	0.965
4	0.632	0.661	0.687	0.712	0.736	0.758	0.779	0.798	0.816	0.833	0.849
5	0.56	0.585	0.608	0.631	0.652	0.672	0.692	0.71	0.727	0.743	0.759
6	0.502	0.525	0.546	0.566	0.586	0.605	0.623	0.64	0.656	0.672	0.687
7	0.456	0.476	0.495	0.514	0.532	0.55	0.566	0.583	0.598	0.613	0.628
8	0.417	0.435	0.453	0.471	0.488	0.504	0.52	0.535	0.55	0.565	0.578

Рис. 8. Фрагменты исходной матрицы поля зависимостей установления амплитуд импульса

```
q := | for i ∈ 0..20
     |   | for j ∈ 0..249
     |   |   if (Q_{i,j} = 1) ∧ (Q_{i,j+1} = 0)
     |   |     | (tempq ← j)
     |   |     | break
     |   | temp2q_i ← tempq
     | return temp2q

g := | for i ∈ 0..20
     |   | for j ∈ 0..249
     |   |   if (G_{i,j} = 0) ∧ (G_{i,j+1} = 1)
     |   |     | (tempg ← j + 1)
     |   |     | break
     |   | temp2g_i ← tempg
     | return temp2g

time:= | for temptime ∈ 0..20
       |   | timeresult ← T(g_temptime) − T(q_temptime)
       |   | result_temptime ← timeresult
       | return result
```

$time^T =$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0	1.2	1.4	1.8	2.2	3	4	5	6	6.9	7.8	8.8	9.8	10.6	11.5

Рис. 9. Код программы для среды MathCad

на заданном уровне, а для ρ>2 колебания не возникают уже при любых значениях $x \geq 0{,}5$. Для практики это означает, что последовательные этапы конструктивной доработки и перемотки трансформатора с целью уменьшения выброса в ряде случаев могут быть заменены на упрощенный этап подбора величины сопротивления в цепи передачи. Это позволяет при известной частоте колебательного процесса достаточно просто определить значения коэффициентов x, ρ, оценить добротность, величины паразитных параметров цепи и внести поправки в исходные расчетные соотношения применительно к данной схеме.

Длительность фронта импульса на интервале времени установления амплитуды от уровня 0,1 до 0,9 удобно определить по разности номеров столбцов матриц типа TRUE/FALSE $Q_{i,j}=0{,}1 \geq M_{i,j}$ и $G_{i,j}=0{,}9 \leq M_{i,j}$, которые отражают переход значений матриц от нуля к единице. В качестве иллюстрации этого способа ниже (рис. 8) приведены фрагменты исходной матрицы поля зависимостей установления амплитуд импульса $M_{i,j} = U2(a_i, T_j)$ при $i = 0...20\, a_i = 0{,}1 + 0{,}2 \cdot i;\ j = 0...250;\ T_j = 0{,}1 + 0{,}1 \cdot j$ и матриц $Q_{i,j}$, $G_{i,j}$, позволяющих выполнить расчет, например, для значения a=0,5.

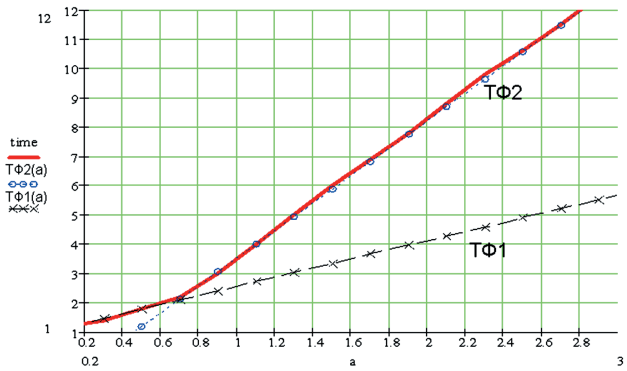


Рис. 10. Длительность переднего фронта импульса цепи второго порядка в зависимости от величины коэффициента затухания

Для автоматизации получения информации о длительности переднего фронта импульсов при любой форме переходного процесса можно воспользоваться функциями программирования Mathcad. На рис. 10 приведена зависимость относительной длительности переднего фронта, построенная по результатам расчета по программе на рис. 9.

График достаточно хорошо аппроксимируется двумя линейными зависимостями

$$T_{ФР1} = 1{,}56 \cdot a + 1{,}0 \text{ при } a \leq 0{,}7;$$

$$T_{ФР2} = 4{,}68 \cdot a - 1{,}14 \text{ при } a \geq 0{,}7,$$

уточняет результаты [11, 15, 17], а отклонения зависимостей от расчетной кривой не превосходят значений указанных на рис. 11.

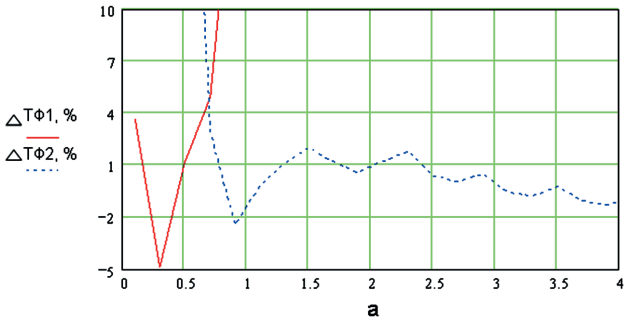


Рис. 11 Погрешность аппроксимации длительности переднего фронта импульса

Аналогичным образом определяется число дроблений и их длительность на заданном пороге исследования переднего фронта импульса. В частности, задержка срабатывания исполнительного устройства, вычисленная для порога по критерию «идеального наблюдателя», также может быть представлена в виде двух аппроксимаций:

$T_З = 0{,}6 \cdot a + 0{,}6$ при $0{,}1 \leq a \leq 1{,}5$,

$T_З = 1{,}15 \cdot a$ при $1{,}0 \leq a \leq 4{,}0$.

В общем случае характер заднего фронта импульса аналогичен переднему, но применительно к конкретному

случаю рис. 1 он указывает на работу трансформатора преобразователя в режиме прерывистого магнитного потока (разрывного тока), когда вся запасенная энергия уже передана в нагрузку и следующий цикл будет начинаться с нулевого значения тока. При этом за счет индуктивности намагничивания трансформатора и суммарной емкости цепи обязательно возникают низкочастотные колебания с частотой

$$f = \left(2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_1 \cdot C_0'}\right)^{-1}.$$

Для заданной выходной мощности $P_{\text{вых}}$ колебания могут быть устранены только при переводе трансформатора в режим непрерывного магнитного потока (безразрывных токов) путем существенного увеличения индуктивности первичной обмотки или уменьшением периода следования импульсов T_0 при неизменной длительности $t_{\text{имп}}$ прямого хода:

$$I_1 = \left[2 \cdot P_{\text{вых}} \cdot T_0 \left(\eta \cdot L_1\right)^{-1}\right]^{-0,5},$$

$$L_1 = \left(U_1 \cdot t_{\text{имп}}\right)^2 \cdot \left(2 \cdot P_{\text{вых}} \cdot T_0\right)^{-1}.$$

Базовыми соотношениями в этом случае выступают необходимая величина тока и индуктивность первичной обмотки, но это уже относится к элементам расчета схемы преобразователя и выходит за рамки обсуждаемой задачи.

Заключение

В заключение стоит отметить, что оптимизация временных и амплитудных характеристик импульса на выходе трансформатора достигается в результате сознательного компромисса между электрическими, конструктивными и технико-экономическими показателями, которыми руководствуется разработчик при проектировании. Попытка привести все параметры к идеальным значениям затруднена, поскольку улучшение одного параметра ведет к ухудшению сразу нескольких других: уменьшение паразитной емкости путем секционирования обмоток увеличивает габариты и сложность изготовления изделия, а выравнивание формы импульса за счет повышения индуктивности намагничивания ведет к росту индуктивности рассеяния и активного сопротивление обмотки и т.п.

Выводы

Методика определения временных характеристик переходного процесса на заданном пороге анализа и полученные в работе соотношения позволяют установить требования к электрическим параметрам трансформатора, при которых обеспечиваются условия минимума искажений импульса на его выходе.

Библиографический список

1. Русин Ю.С. Трансформаторы звуковой и ультразвуковой частоты. Л.: Энергия, 1973. 152 с.

2. Philips Semiconductors. Design of HF wideband power transformers // Application Note ECO6907, 1998. 23 p.

3. Philips Semiconductors. Design of H.F. Wideband Power Transformers, Part II // Application Note ECO7213, 1998. 10 p.

4. Ковалев Н. Применение широкополосных трансформаторов в радиоэлектронной аппаратуре // Компоненты и технология. 2005. № 2. С. 36-38.

5. Зееман С., Осипов А., Сандырев О. Особенности работы высокочастотного трансформатора в схеме последовательного резонансного инвертора // Силовая электроника. 2007. № 1. С. 67-73.

6. Компоненты для построения источников питания. Группа компаний «Симметрон» [электронный ресурс]. URL: www.symmetron.ru/articles/brochures/SMPS.pdf (дата обращения 28.03.2022)

7. Бердников Д.В. Измерение индуктивности рассеяния в трансформаторах импульсных преобразователей с помощью LRC-метра // Современная электроника. 2006. № 8. С. 58-61.

8. Ридли Р. Измерение импеданса трансформаторов. Разработка и конструирование // Электронные компоненты. 2011. №12. С. 10-11.

9. ОСТ4-473.002-78. Трансформаторы сигнальные и дроссели аппаратуры связи. Методы измерения основных параметров.

10. Расчет и моделирование повышающее-понижающего преобразователя напряжения // Схемотехника. 2007. № 4. С. 6-9; № 5. С. 2-6; № 6. С. 8-11; № 7. С. 9-12.

11. Матханов П.Н., Гоголицын Л.З. Расчет импульсных трансформаторов. Л.: Энергия, 1980. 112 с.

12. Кузнецов А. Трансформаторы и дроссели для импульсных источников питания // Схемотехника. 2000. № 1. С. 30-33; № 2. С. 48-49; 2001. № 1(3). С. 32-34.

13. ОСТ4-ГО.012.013. Трансформаторы для аппаратуры проводной связи. Типовой расчет.

14. Волков Е.А., Санковский Э.И., Сидорович Д.Ю. Теория линейных электрических цепей железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: Учебник для вузов ж.д. транспорта. М.: Маршрут, 2005. 509 с.

15. Лэнди Р., Дэвис Д., Албрехт А. Справочник радиоинженера. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1961. 704 с.

16. Справочник по радиоэлектронике в трех томах: Т. 1 / Под ред. А.А. Куликовского. М.: Энергия, 1967. 640 с.

17. Каштанов В.В. Анализ фронта выходных импульсов трансформатора // Радиотехника. 1995. № 12. С. 39-40.

References

1. Rusin Yu.S. [Audio and ultrasonic frequency transformers]. Leningrad: Energiya; 1973. [in Russ.]

2. Philips Semiconductors. Design of HF wideband power transformers. Application Note ECO6907; 1998.

3. Philips Semiconductors. Design of H.F. Wideband Power Transformers, Part II. Application Note ECO7213; 1998.

4. Kovaliov N. [Application of broadband transformers in electronic equipment]. *Komponenty i tekhnologii* 2005;2:36-38. (in Russ.)

5. Zeman S., Osipov A., Sandyrev O. [Specific performance features of the high-frequency transformer in the circuit of a serial resonance inverter]. *Silovaya elektronika* 2007;1:67-73. (in Russ.)

6. Components of supply equipment. Symmetron Group. (accessed 28.03.2022). Available at: www.symmetron.ru/articles/brochures/SMPS.pdf. (in Russ.)

7. Berdnikov D.V. Measuring the leakage inductance in transformers of pulse converters using an LCR meter. *Sovremennaya elektronika* 2006;8:58-61. (in Russ.)

8. Ridley R. Measuring the impedance of transformers. *Elektronnye komponenty* 2011;12:10-11. (in Russ.)

9. [OST 4-473.002-78. Signal transformers and chokes of telecommunication equipment. Methods for measuring critical parameters]. (in Russ.)

10. [Calculation and simulation of up/down voltage converter]. *Skhemotekhnika* 2007;4:6-9;5:2-6;6:8-11;7:9-12. (in Russ.)

11. Matkhanov P.N., Gogolitsyn L.Z. Pulse transformer design. Leningrad: Energiya; 1980. (in Russ.)

12. Kuznetsov A. [Transformers and chokes for switched-mode power supplies]. *Skhemotekhnika* 2000;1:30-33;2:48-49; 2001;1(3):32-34. (in Russ.)

13. [OST 4-GO.012.013. Transformers for landline communication system. Routine calculation]. (in Russ.)

14. Volkov E.A., Sankovsky E.I., Sidorovich D.Yu. [Theory of linear electric circuits of railway automation assets: textbook for railway colleges]. Moscow: Marshrut; 2005. (in Russ.)

15. Landee R., Davis D., Albrecht A. Electronic designers' handbook. Moscow – Leningrad: Gosenergoizdat; 1961.

16. Kulikovsky A.A., editor. [Electronics handbook in three volumes. Volume 1]. Moscow: Energiya; 1967. (in Russ.)

17. Kashtanov V.V. [Analysis of the leading edge of a transformer's output pulse]. *Radiotekhnika* 1995;12:39-40. (in Russ.)

Сведения об авторах

Батраев Владимир Петрович – начальник сектора научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»), Москва, Российская Федерация, e-mail: v.batraev@vniias.ru

Батраев Владимир Владимирович – заместитель начальника отделения – начальник отдела научно-исследовательского и проектно-конструкторского института информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте (АО «НИИАС»), Москва, Российская Федерация, e-mail: exartus@mail.ru

About the authors

Vladimir P. Batraev, Head of Sector, Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation (JSC NIIAS), Moscow, Russian Federation, e-mail: v.batraev@vniias.ru.

Vladimir V. Batraev, Deputy Head of Division, Head of Unit, Research and Design Institute for Information Technology, Signalling and Telecommunications in Railway Transportation (JSC NIIAS), Moscow, Russian Federation, e-mail: exartus@mail.ru.

Вклад авторов в статью

Батраев В.П. Сформулированы принципы инженерной методики. Участие в обсуждении методов исследования и анализ полученных результатов.

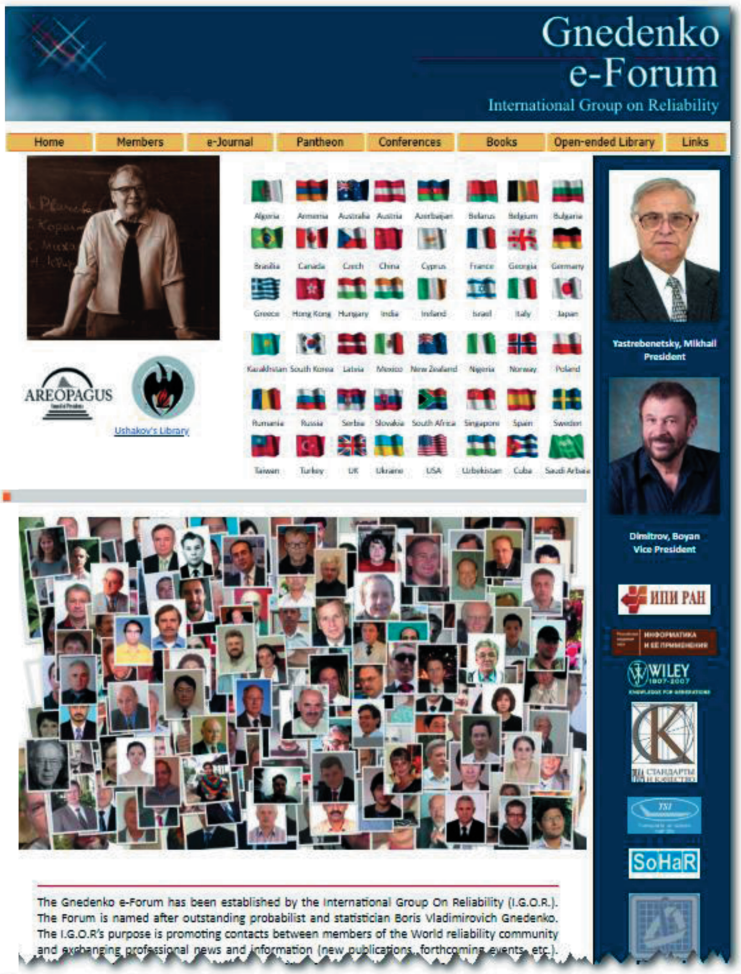
Батраев В.В. На основании математического аппарата обоснована инженерная методика. Выполнение расчетов и формулирование выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

GNEDENKO FORUM

INTERNATIONAL GROUP ON RELIABILITY



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

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

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

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

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

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

С 2017 года журнал индексируется в международной базе Scopus.

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

www.gnedenko.net

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, междустрочный 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, междустрочный 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, междустрочный 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:

[1]Московский государственный университет, Российская Федерация, Москва
[2]Санкт-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, междустрочный 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 разделов 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 подрисуночные 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). Подрисуночная 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 подрисуночной подписи не ставится. *При выравнивании по центру абзацный отступ всегда должен отсутствовать!* Все обозначения, приведенные на рисунках, необходимо пояснять в основном или подрисуночном тексте. Недопустимы отличия в обозначениях на рисунках и в тексте (включая различие прямых/наклонных символов). *При проблемах с версткой рисунков, вставленных в текст, авторы должны по запросу редакции предоставить данные рисунки в графическом формате, в виде файлов с расширениями* *.tiff, *.png, *.gif, *.jpg, *.eps.

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

Табл. 2. Описание жизненно важных процессов

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

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

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

Формулы могут быть включены непосредственно в текст, например:

Пусть $y = a{\cdot}x + b$, тогда…,

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

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

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

$$y = a{\cdot}x + b. \qquad (1)$$

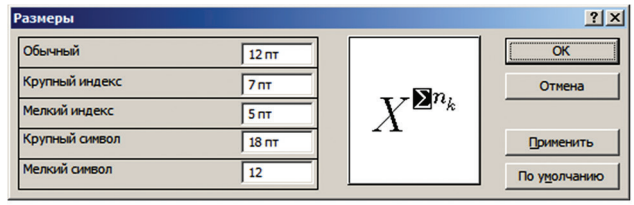
Если формула набирается в отдельной строке и имеет номер, то данная строка выравнивается по правому краю, а формула и номер разделяются знаком табуляции; позиция табуляции (в см) выбирается таким образом, чтобы формула располагалась примерно по центру. Формулы, на которые в тексте делаются отсылки, нумеруются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

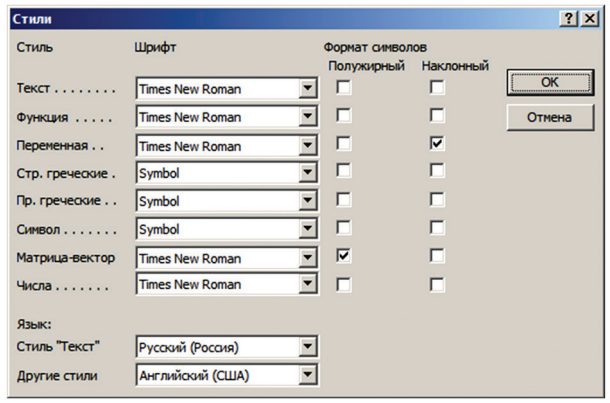
Простые формулы следует набирать без применения формульного редактора (использовать в MS Word русские и латинские буквы, а также меню «Вставка» + «Символ», если требуются греческие буквы и математические операторы), с соблюдением требуемого наклона для латинских символов, например:

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

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

Сложные формулы набираются с применением редактора формул. Для отсутствия проблем с редактированием 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):

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

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 удается его найти (для зарубежных источников удается это сделать в 95% случаев).

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

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

В описании каждого источника должны быть представлены все авторы.

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

Оформление:

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

Библиографические ссылки набираются шрифтом Times New Roman, 12 пт, междустрочный интервал 1,5 строки, выравнивание по ширине, с абзацным отступом слева 1,25 см. Начертание шрифта «обычный» (см. примеры оформления в ГОСТ Р 7.0.5). Каждая запись имеет нумерацию арабскими цифрами с точкой после номера раздела. Номер с точкой отделяются от записи неразрывным пробелом (Ctrl+Shift+Spacebar).

10) Сведения об авторах

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

Оформление:

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

11) Вклад авторов в статью

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

Оформление:

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

12) Конфликт интересов

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

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

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

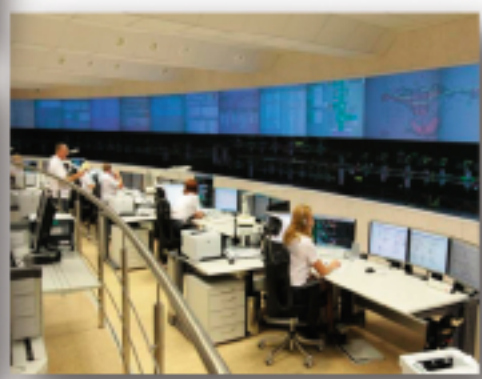
Оформление:

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

ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ ПРИ УЧАСТИИ И ПОДДЕРЖКЕ

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

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



Цели:

- ❑ эффективность,
- ❑ безопасность
- ❑ надежность перевозок

Основные направления деятельности

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

www.vniias.ru