

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, ученый секретарь НТС АО «НИИАС» (Москва, РФ)

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

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

Технический редактор:

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

Председатель редакционного совета:

Розенберг Игорь Наумович – доктор технических наук, профессор, член-корреспондент РАН, заведующий кафедрой «Геодезия, геоинформатика навигация», проректор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет транспорта» (Москва, РФ)

Сопредседатель редакционного совета:

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

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

УЧРЕДИТЕЛИ ЖУРНАЛА:

АО «НИИАС», НП «ОПЖТ»,
Шубинский И.Б.

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

*Регистрационное свидетельство
ПИ № ФС77-46055 от 05 августа 2011 года.*

Официальный печатный орган Российской академии надежности

Издатель журнала

ООО «Журнал «Надежность»

Генеральный директор

Дубровская А.З.

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

ООО «Журнал «Надежность»

www.dependability.ru

Отпечатано в ООО «Отмара. нет». 107140,
г. Москва, Верхняя Красносельская, 2/1, стр. 2,
этаж 2, пом II, ком. 2А, 2Б

Подписано в печать 15.06.2023

Объем , Тираж 500 экз, Заказ №
Формат 60х90/8, Бумага глянец

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

Статьи рецензируются.
Статьи опубликованы в авторской редакции.

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

Рецензируемый научно-практический журнал «Надёжность» включен в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендуемых Высшей аттестационной комиссией России для опубликования основных научных результатов диссертаций на соискание учёной степени кандидата и доктора наук по следующим специальностям и соответствующим им отраслям науки:

1.2. Компьютерные науки и информатика

1.2.1. Искусственный интеллект и машинное обучение (физико-математические науки)

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (физико-математические, технические науки)

2.3. Информационные технологии и телекоммуникации

2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки)

2.3.3. Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (технические науки)

2.3.4. Управление в организационных системах (технические науки)

2.3.5. Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки)

2.3.6. Методы и системы защиты информации, информационная безопасность (технические науки)

2.9. Транспортные системы

2.9.1. Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте (технические науки)

2.9.4. Управление процессами перевозок (технические науки)

2.9.8. Интеллектуальные транспортные системы (технические науки)

Журнал «Надёжность» входит в категорию K2 перечня рецензируемых научных изданий ВАК (строка 1483), утвержденного информационным письмом Высшей аттестационной комиссии при Минобрнауки России от 6 декабря 2022 № 02-1198 «О категорировании Перечня рецензируемых научных изданий».

СОДЕРЖАНИЕ

Управление рисками

Аль-Раухани Н.М., Алехин В.Н. Оценка рисков в отношении резервуарных емкостей в нефтегазовой промышленности.....3

Интеллектуальные системы управления

Баранов Л.А., Балакина Е.П., Юнцян Чжан Анализ погрешностей прогноза для интеллектуальных систем управления и предиктивной диагностики12

Структурная надежность. Теория и практика

Нетес В.А. Отказы по общей причине: определения и типичные ошибки19

Похабов Ю.П. Метод проектирования и конструирования механизмов космического назначения с заданной надежностью26

Антонов А.В., Чепурко В.А. Об одной задаче расчета комплекта запасных элементов, имеющих отказы двух типов39

Тивари Адитья, Тивари Свати. Оценка клиентоориентированных показателей и исследование надежности системы электроснабжения49

Методы и системы защиты информации. информационная безопасность

Веселова В.А., Коломойцев В.С. Подход к обнаружению аномалий в самоподобном сетевом трафике.....57

Системный анализ в задачах надежности и безопасности

Цициашвили Г.Ш., Радченкова Т.В. Система массового обслуживания без очереди и с детерминированным временем64

Гнеденко – Форум69

Оценка рисков в отношении резервуарных емкостей в нефтегазовой промышленности

Risk assessment in storage tanks of the oil and gas industry

Аль-Раухани Н.М.^{1*}, Алехин В.Н.¹

Al-Rawhani N.M.^{1*}, Alekhin V.N.¹

¹Институт строительства и архитектуры, Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Российская Федерация

¹Institute of Civil Engineering and Architecture, Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia,

*Nal-raukhani@urfu.ru



Аль-Раухани Н.М.



Алехин В.Н.

Резюме. Цель. Аварии на нефтегазовых объектах являются одной из основных причин загрязнения окружающей среды и гибели людей. В целях решения проблемы обеспечения безопасности нефтегазовых объектов был проведен обзор их состояния в Йеменской Республике, проанализированы статистические данные об авариях, определены события, вызывающие пожары в опасных ситуациях, и построены сценарии возникновения и распространения пожаров путем изучения аварии на нефтеперерабатывающем заводе в Адене, а также оценены выбросы в атмосферу масс легковоспламеняющихся веществ в результате пожароопасных ситуаций, определены комплексы факторов пожарной опасности для различных сценариев распространения, оценены последствия воздействия факторов пожарной опасности на людей, разработана основа для оценки рисков и управления ими.

Abstract. Aim. Accidents at oil and gas facilities are among the main causes of environmental pollution and loss of life. In the interests of solving the problem of ensuring the safety of oil and gas facilities, a review of the state of oil and gas facilities in the republic of Yemen was carried out, statistical data on accidents were analysed, defined the events that cause a fire in hazardous situations and build scenarios for the occurrence and development of fires through the study of an accident in the Aden refinery, also assessment of the mass of flammable substances entering the surrounding space as a result of fire hazardous situations, construction of fields of hazardous factors of fire for various scenarios of its development, assessment of the consequences of exposure to hazardous fire factors on people, and a base was developed for risk assessment and management.

Ключевые слова: нефтегазовые объекты, авария, дерево сценариев, тепловой поток, факторы опасности.

Keywords: oil and gas facilities, accident, scenario tree, heat flux, factors of hazardous.

Для цитирования: Аль-Раухани Н.М., Алехин В.Н. Оценка рисков в отношении резервуарных емкостей в нефтегазовой промышленности // Надежность. 2023. №2. С. 3-11. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-2-3-11>

For citation: Al-Rawhani N. M., Alekhin V. N. Risk assessment in storage tanks of the oil and gas industry. Dependability 2023;2:3-11. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-2-3-11>

Поступила: 04.02.2023 / **После доработки:** 03.05.2023 / **К печати:** 15.06.2023

Received on: 04.02.2023 / **Revised on:** 03.05.2023 / **For printing:** 15.06.2023

Введение

Нефтегазовая промышленность в силу ее вклада в ВВП и государственный бюджет Йеменской Республики имела стратегическое значение для страны с момента ее открытия в середине восьмидесятых годов прошлого века и до сегодняшнего дня [1]. Большая часть экономики и, следовательно, огромное количество рабочих мест как прямо, так и косвенно зависят от нее. Таким образом, любое нарушение в ее работе может повлечь

значительный ущерб, а также экономические и экологические последствия.

Риски безопасности на объектах нефтегазовой промышленности существенны и должны оцениваться для определения того, являются ли принимаемые меры безопасности адекватными или нуждаются в усилении.

Целью настоящего исследования было оценить риски в отношении резервуаров для хранения нефти и газа и определить расстояние, которое должно разделять нефтегазовые и другие объекты (школы, дороги, больницы и т.д.).

Обзор состояния нефтегазовых объектов

Нефтегазовая отрасль в Йеменской Республике обладала стратегической значимостью с момента начала своего функционирования. По этой причине было спроектировано и построено множество объектов для хранения и транспортировки нефтегазовых продуктов.

В настоящей статье рассмотрены наиболее важные нефтегазовые объекты в Йеменской Республике (рис. 1).

А) Нефтеперерабатывающие заводы

В Йеменской Республике есть четыре нефтеперерабатывающих завода. Из них в настоящее время работают только нефтеперерабатывающие заводы в Адене и Марибе, а нефтеперерабатывающие заводы в Рас-Исе и Аль-Шахре не функционируют [2, 3].

1. Аденский нефтеперерабатывающий завод [4] – крупнейшее промышленное предприятие в стране и один из старейших нефтеперерабатывающих заводов в Йеменской Республике, построенный компанией British Petroleum в 1954 году. Мощность Аденского нефтеперерабатывающего завода составляет около 5 млн т нефти в год. В 1977 году он перешел в собственность государства. Хотя нефтеперерабатывающему заводу 66 лет, он по-прежнему достаточно эффективно функционирует благодаря постоянному техническому обслуживанию. Он перерабатывает около 170 тыс. баррелей нефти в сутки.

2. Марибский нефтеперерабатывающий завод – один из важнейших объектов по добыче нефти в Йемене, построенный американской нефтяной компанией Hunt в 1986 году. Мощность Марибского нефтеперерабатывающего завода составляет около 10 тыс. баррелей в сутки. В декабре 1995 года, после окончания действия договора с компанией Hunt, он стал собственностью Йемена [4].

Согласно исследованию Statistical Survey of World Energy, доказанные запасы газа в Йеменской Республике составляют 490 млрд кубометров, или около 0,3 процента от мирового объема. Большая часть газа находится на месторождениях Мариб – Аль-Джуф. Его в основном перекачивают для увеличения добычи нефти.

Йеменский экспортный завод по производству СПГ в г. Балхаф, открытый в 2009 году, находится в управлении французской нефтяной компании Total. Это крупнейший промышленный проект в Йеменской Республике, основанный на проверенном промышленном стандарте C3/MR API. Он состоит из двух параллельных технологических линий с общей гарантированной производительностью 6,7 млн метрических тонн газа в год. Кроме того, действуют два резервуара для хранения объемом 140 000 м³, а также вспомогательные сооружения, включая производство электроэнергии, опреснение, очистку сточных вод и выработку пара. Это позволяет заводу работать эффективно, надежно и экологично в соответствии с применимыми международными стандартами.

Б) Нефте- и газопроводы

Йеменская Республика располагает сетью нефтепроводов протяженностью 872 мили, которые связывают три крупные нефтяные провинции с пятью экспортными терминалами: Аден, Рас-Иса, Ходейда, Бир-Али и Аш-Шахр.

В 1985 году были спроектированы и построены первые 270 километров трубопроводов от бассейна Мариб до Рас-Исы, крупнейшего экспортного терминала в Красном море пропускной способностью 400 тыс. баррелей в день. Терминал Рас-Иса обслуживается танкером Safer и имеет хранилища емкостью 3 млн. баррелей.

В Йеменской Республике есть три основных маршрута транспортировки сырой нефти из районов добычи в морские порты как в Красном, так и в Аравийском морях. Есть соответственно три порта для экспорта сырой нефти на международный рынок:



Рис. 1. Нефтегазовые объекты в Йеменской Республике

1) Порт Рас-Иса расположен на Красном море в мухафазе Ходейда и представляет собой остров с резервуарным парком для погрузки и разгрузки судов с сырой нефтью на экспорт.

2) Порт Аш-Шахр (Даба), расположенный на берегу Аравийского моря в мухафазе Хадрамаут, который наделяется правом загрузать и отправлять суда с сырой нефтью.

3) Порт Балхаф (Бир Али), расположенный на берегу Аравийского моря в мухафазе Шабва и уполномоченный загрузать и отправлять суда с сырой нефтью для экспорта из сектора Западный Айяд, использование которого ограничено ввиду небольшого объема производства в этом секторе и возможности подключения к соседним месторождениям. В этом порту имеется пять резервуаров емкостью 126 тыс. баррелей каждый. Порт был основан в 1990 году.

Трубопроводы неоднократно подвергались нападениям, что привело к сокращению объемов добычи и экспорта нефти.

По данным Министерства нефти и минеральных ресурсов Йеменской Республики, более 92 нефтегазовых объектов, включая нефтеперерабатывающие заводы, нефте- и газопроводы, порты, экспортные терминалы нефти и газа, автозаправочные станции, прекратили работу в период с 2011 по 2020 год из-за множества возникших на них проблем. По этой причине был проведен статистический анализ данных по несчастным случаям.

Анализ аварийности нефтегазовых объектов

Сбор и анализ данных об авариях широко признан углеводородной промышленностью в качестве важного элемента эффективной системы управления безопасностью. По этой причине нами были собраны и проанализированы данные по авариям, произошедшим за последние десять лет на нефтегазовых объектах Йеменской Республики. Информация включала в себя открытые данные органов гражданской обороны, а также сведения о сотрудниках нефтегазовых компаний.

Известно, что ежегодно в мире на объектах нефтепереработки происходит до 1500 происшествий, 4% из которых сопровождаются значительными человеческими жертвами. Ежегодный материальный ущерб от этих аварий превышает 100 миллионов долларов. Аварийность на предприятиях постоянно растет [6].

Основными сценариями чрезвычайных ситуаций, которые представляют опасность для предприятия и прилегающей территории, являются пожар, взрыв топливных агрегатов и аварийное химическое заражение. Так, за период с 2011 по 2020 год произошло 329 опасных происшествий, в том числе 171 пожар (51,98% от общего числа чрезвычайных ситуаций), 142 взрыва (43,16%), 16 выбросов опасных веществ (4,86%). На основании анализа причин произошедших опасных событий можно сделать вывод, что в большинстве случаев причина заключается в человеческом факторе (терроризм, нарушение

правил безопасности, технологического процесса), технических сбоях (отсутствие периодического осмотра и небрежность в процессе технического обслуживания), отсутствие оборудования и внешние воздействия, не предусмотренные конструкцией [7, 8, 9] (рис. 2).

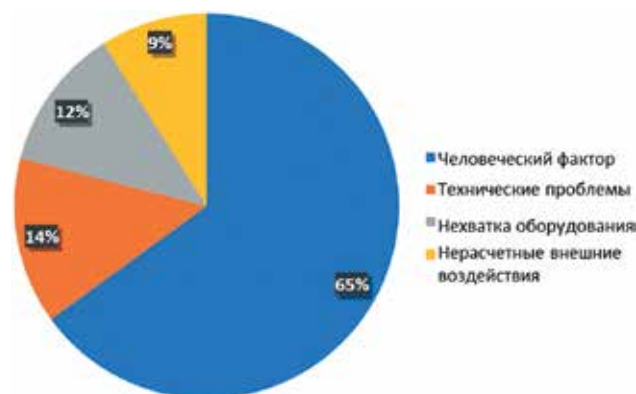


Рис. 2. Анализ причин аварий на нефтегазовых объектах в Йеменской Республике

Анализ результатов расследования причин аварий на нефтегазовых предприятиях Йеменской Республики за последние 10 лет (2011 – 2020 гг.) показывает, что неудовлетворительная работа служб обеспечения безопасности является их основной причиной. При этом значительная часть аварий на нефте- и газопроводах происходит из-за отсутствия необходимых средств защиты, отсутствия оборудования и внешних воздействий, не предусмотренных конструкцией [2, 9].

Практическое исследование

Авария с пожаром на нефтеперерабатывающем заводе в Адене

Одно из последних происшествий имело место 11 января 2019 года. После взрыва на нефтеперерабатывающем заводе в Адене произошел сильный пожар (рис. 3) [10]. По информации источников, взрыв произошел в одной из транспортных труб, после чего огонь перекинулся на резервуар № 313 и соседние резервуары. В результате ранения получили более 15 рабочих и пожарных [11].

По информации местного источника в правоохранительных органах причина аварии неизвестна. Источники в профсоюзных организациях на нефтеперерабатывающих заводах Адена указали, что пожар привел к обрушению опорных конструкций резервуара. Последние разделились на две части в результате эрозии металла. В силу небрежного отношения опасность угрожала всем резервуарам еще до пожара.

Согласно методологии [12, 13], для определения расчетных величин риска пожара на производственных объектах при анализе пожарной опасности объектов топливно-энергетического комплекса, где проходят процессы с использованием горючих газов и жидкостей, как правило, рассматриваются инициирующие события, связанные с разгерметизацией и полным квази-мгновен-

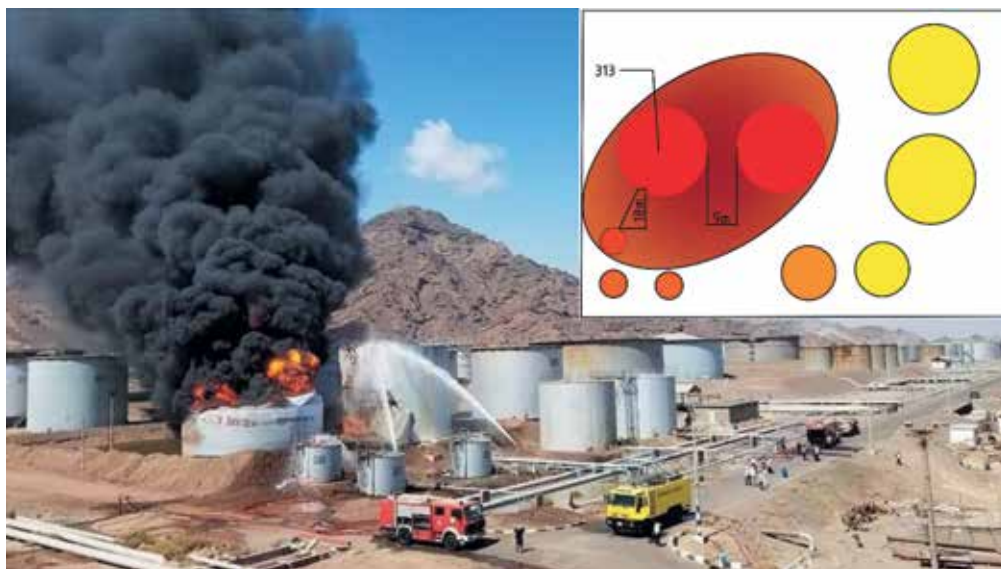


Рис. 3. Пожар на нефтеперерабатывающем заводе

ным разрушением каждой единицы технологического оборудования. Кроме того, при рассмотрении сценария развития пожароопасной ситуации необходимо учитывать все прочие факторы, включая силу и направление ветра, температуру жидкости, давление газа и др. Таким образом, применительно к производственному объекту, даже если число единиц его технологического оборудования относительно невелико, число сценариев распространения пожаров и взрывов, опасные факторы которых необходимо оценить, может достигать порядка тысячи, что практически невозможно без использования соответствующего программного обеспечения [14, 15].

Вначале определяются события, инициирующие пожароопасные ситуации, и строятся сценарии возникновения и распространения пожаров.

Для построения набора сценариев возникновения и развития пожароопасных ситуаций на рассматриваемом объекте был использован метод логических деревьев событий. Логические деревья событий, лежащие в основе оценки риска пожара для рассматриваемого объекта, строились на основе события, рассматриваемого в качестве инициирующего пожароопасные ситуации и пожары на нефтеперерабатывающем заводе:

- разгерметизация резервуаров с образованием разлива в насыпи;
- полное разрушение резервуаров с образованием разлива в насыпи и переливом части жидкости за пределы насыпи.

На рис. 4 показана частота возникновения событий, инициирующих пожароопасные ситуации для оборудо-

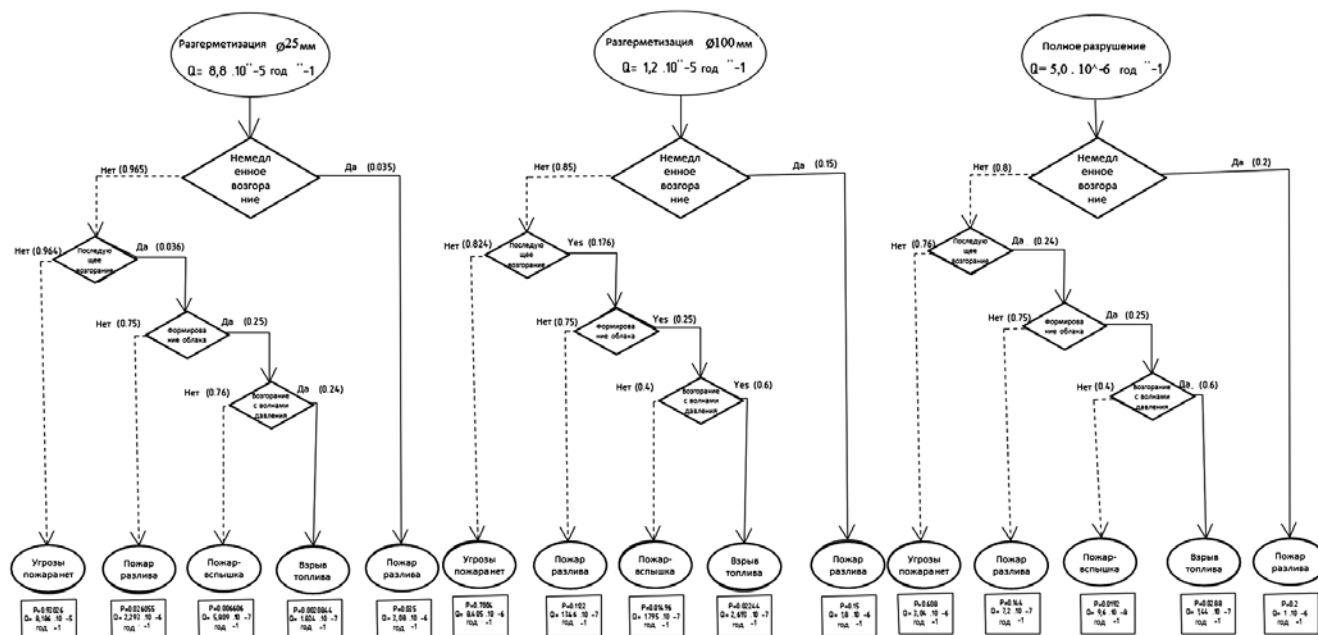


Рис 4. Дерево сценариев

вания нефтеперерабатывающего завода в Адене, взятая в соответствии с методикой определения расчетных значений риска пожара на производственных объектах (дерево сценариев) [16, 17].

Изучая сценарии пожара на объекте с помощью программного обеспечения «PromRisk» [15], мы можем узнать пределы наиболее масштабных сценариев, которые могут иметь место и с учетом которых мы можем спроектировать границы объекта и провести информирование работников на объекте и в прилегающих районах.

Мы можем провести оценку массы горючих веществ, попадающих в окружающее пространство в результате пожароопасных ситуаций.

Количество горючих веществ, попадающих в окружающее пространство, которые могут образовывать взрывоопасные газозвушнне смеси или разливы горючих сжиженных газов, легко воспламеняющихся и горючих жидкостей на подстилающей поверхности, определяется исходя из следующих допущений:

а) в одном из резервуаров происходит рассчитанная авария;

б) все содержимое емкости или часть продукта попадает в окружающее пространство. В этом случае, если на объекте имеется несколько резервуаров, расчет следует проводить для каждого.

Масса жидкости, поступающей в окружающее пространство при разгерметизации резервуара, определяется по формуле:

$$m_i = V_i \cdot \rho_i, \quad (1)$$

где m_i – масса жидкости, кг; ρ_i – плотность жидкости, кг/м³; V_i – объем жидкости в резервуаре, м³.

Масса жидкости, поступающей самотеком при полном разрушении резервуара, определяется по формулам:

$$m_i = G_L \cdot \tau + \pi d_i^2 / 4 \cdot \left(\sum_{i=1}^n L_i \right) \cdot \rho_i, \quad (2)$$

$$Q_i = \mu \cdot d^2 / 4 \cdot \sqrt{2gH_i}, \quad (3)$$

где m_i – масса жидкости, кг; ρ_i – плотность жидкости, кг/м³; G_L – начальная скорость потока жидкости, вытекающей из резервуара по разгерметизированному

трубопроводу, кг/с; τ – расчетное время остановки трубопроводов, связанное с разгерметизацией, с; Q_i – объемная скорость потока вытекающей жидкости; d_i – диаметр трубопроводов, м (в случае если диаметры трубопроводов, связанных с местом разгерметизации, различаются, объем вытекающей жидкости рассчитывается для каждого трубопровода отдельно); L_i – длина i -го участка трубопровода от запорного устройства до места разгерметизации, м; n – число секций трубопровода, связанных с участком разгерметизации; H_i – высота столба жидкости (от верхнего уровня жидкости в резервуаре до уровня точки разгерметизации), м; μ – коэффициент эспирации; g – ускорение свободного падения, м/с² ($g = 9,81$).

Результаты расчета массы горючих веществ, попадающих в окружающее пространство в результате аварии, представлены в табл. 1.

На рис. 5 показаны области, в которые выбрасывается нефть из резервуара 313 и резервуара 306 с а) разгерметизацией Ø25 мм, б) разгерметизацией Ø100 мм, в) полным разрушением с попаданием в окружающее пространство в результате пожароопасных ситуаций.

Для локализации разлива топлива в случае аварии, а также для уменьшения площади разлива рекомендуется возводить монолитную железобетонную стену (насыпь) вокруг парка резервуаров таким образом, чтобы технические параметры устройства насыпи соответствовали объему резервуаров.

При построении наборов факторов пожарной опасности для различных сценариев учитывается следующее:

1) тепловое излучение при горении факела, горении разливов горючих веществ на поверхности и огненных шарах;

2) избыточное давление и импульс волны давления при сгорании парогазозвушной смеси в открытом пространстве;

3) избыточное давление и импульс волны давления при разрыве резервуара в результате воздействия огня;

4) осколки, образующиеся при взрывном разрушении элементов технологического оборудования;

5) расширение продуктов сгорания при быстром расширении пламени.

Табл. 1. Анализ расчета массы горючих веществ, попадающих в окружающее пространство в результате аварии

Тип оборудования		(Резервуар 313) 5000 м ³ нефти	(Резервуар 306) 100 м ³ нефти
Нарушение герметичности Ø25 мм	Площадь аварийного разлива нефти, м ²	424,4	268,4
	Масса разлитой жидкости, кг	15809,6	9998,9
	Масса образовавшихся паров, кг	481	304,2
Нарушение герметичности Ø100 мм	Площадь аварийного разлива нефти, м ²	6790,7	2000
	Масса разлитой жидкости, кг	252954,2	74500
	Масса образовавшихся паров, кг	7695,2	2266,4
Полное разрушение	Площадь аварийного разлива нефти, м ²	65027,8	11907,8
	Масса разлитой жидкости, кг	3725000	74500
	Масса образовавшихся паров, кг	73694,7	13494,9

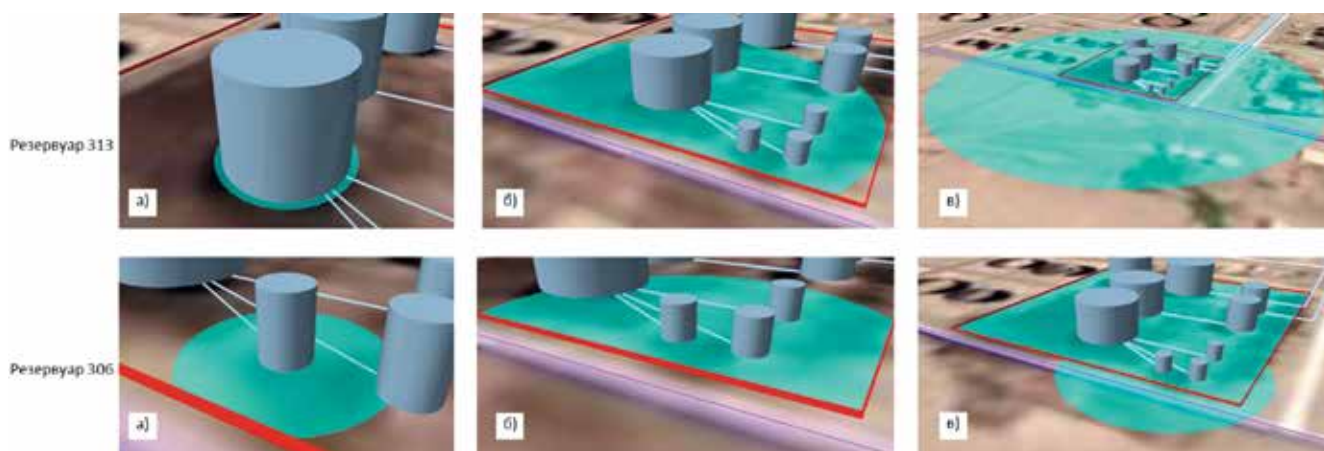


Рис. 5. Резервуары 313 и 306: а) – с разгерметизацией $\varnothing 25$ мм, б) – с разгерметизацией $\varnothing 100$ мм, в) – с полным разрушением

Тепловой поток (также называемый лучистым теплообменом, интенсивностью или плотностью теплового потока, тепловым излучением) – это часть тепловой энергии, проходящая через некоторую произвольную область в единицу времени. Тепловое излучение является разновидностью передачи энергии [18].

Тепловое излучение пламени зависит от многих факторов: диаметра зоны горения, температуры и размера пламени, концентрации сажи, различных химических компонентов продуктов сгорания и т.д. [19].

Интенсивность теплового излучения q , кВт/м², для пожара при разливе жидкости рассчитывается по формуле:

$$q = E_f F_q \tau, \quad (4)$$

где E_f – средняя поверхностная интенсивность теплового излучения пламени, кВт/м²; F_q – геометрический

коэффициент видимости, который определяет долю энергии, излучаемой огнем, которая получается принимающим объектом (угловой коэффициент падающего излучения); τ – коэффициент прозрачности атмосферы к тепловому излучению.

Угловой коэффициент падающего излучения F_q определяется по формуле:

$$F_q = \sqrt{F_v^2 + F_h^2}, \quad (5)$$

где F_v , F_h – коэффициенты падающего излучения в вертикальном и горизонтальном направлениях соответственно.

На рис. 6а показаны значения плотности теплового потока на различных расстояниях от края зоны пожара. На графике (рис. 6б) показаны зависимости теплового потока от расстояния от края пожара для всех указанных вариантов силы ветра. На графике (рис. 6в) показаны зависимости избыточного давления взрыва и импульса фазы сжатия на различных расстояниях от центра облака; г) – поле избыточного давления взрыва

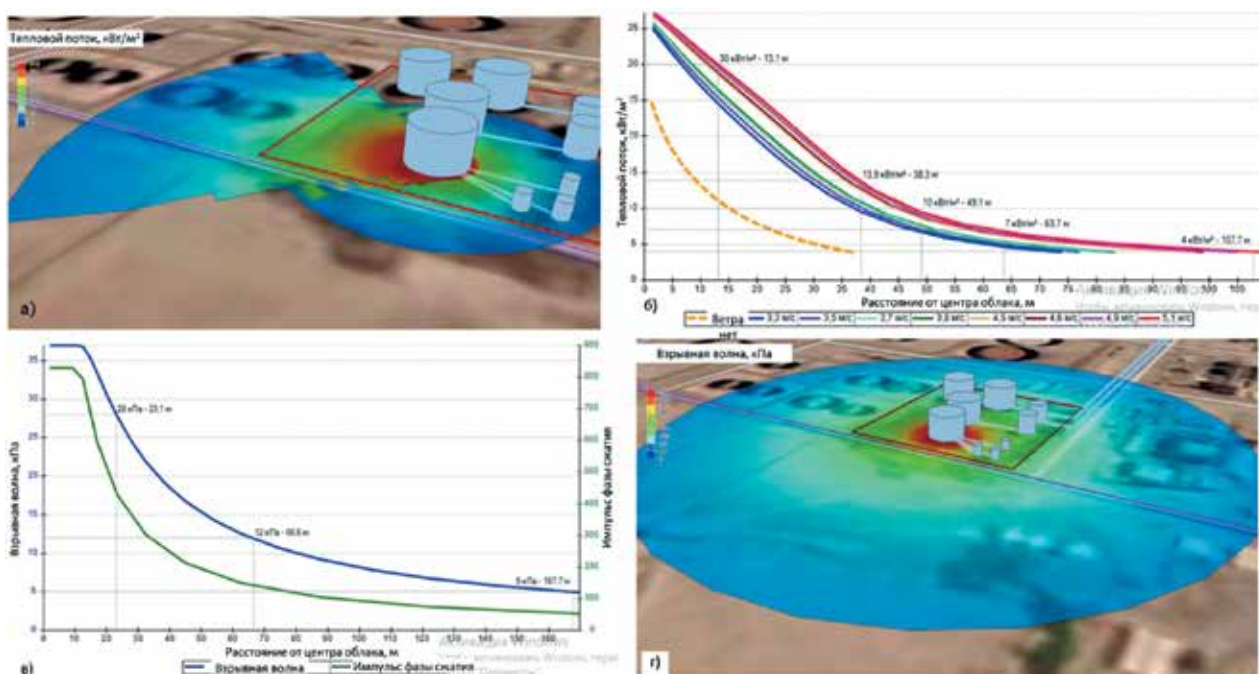


Рис. 6. Резервуар 313: а) – значения плотности теплового потока на различных расстояниях от края зоны пожара; б) – зависимости теплового потока от расстояния от края пожара для всех указанных вариантов силы ветра; в) – избыточное давление взрыва и импульс фазы сжатия на различных расстояниях от центра облака; г) – поле избыточного давления взрыва

потока от расстояния от края пожара для всех указанных вариантов силы ветра. На графике (рис. 6в) показано избыточное давление взрыва и импульс фазы сжатия на различных расстояниях от центра облака. На рис. 6г – поле избыточного давления взрыва в резервуаре 313.

Также для расчета условной вероятности поражения человека тепловым излучением в точке, расположенной на некотором расстоянии от края зоны пожара, используется формула:

$$Q_d = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Pr-5} \exp\left(-\frac{U^2}{2}\right) \cdot dU, \quad (6)$$

где Pr – значения функции вероятности.

Необходимо знать расстояние от точки до зоны, где интенсивность теплового излучения не превышает без-опасного значения (4 кВт/м^2).

На рис. 7а показаны значения условных вероятностей поражения человека тепловым излучением на различных расстояниях от края зоны пожара; а на рис. 7б график показывает зависимость условной вероятности поражения человека от расстояния от края пожара для всех приведенных вариантов силы ветра.

Результаты показывают, что при пожаре в резервуаре 313 интенсивность теплового излучения пожара увеличивается вместе с распространением горения. Максимальная интенсивность излучения в центре пламени составляет $43,1 \text{ кВт/м}^2$. Интенсивность излучения сначала снижается, а затем остается на уровне $24,8 \text{ кВт/м}^2$ в силу стабильности горения и эффекта атмосферной турбулентности. Высота пламени составляет около 23 метров, максимальная скорость дыма – $5,1 \text{ м/с}$.

Заключение

В работе проведен обзор опасных нефтегазовых объектов в Йеменской Республике. Проанализированы аварии на нефтегазовых объектах, произошедшие в Йеменской Республике за последние 10 лет (2011 – 2020 гг.)

Результаты расследования причин аварий на нефтегазовых предприятиях в Йеменской Республике показывают, что основная из них – неудовлетворительное состояние служб обеспечения безопасности, а большая часть аварий на нефтеперерабатывающих заводах про-

исходит из-за отсутствия необходимых средств защиты и периодических проверок, халатного отношения к техническому обслуживанию, отсутствия поправок на внешние факторы.

В результате расчетов были получены графики зависимостей опасных факторов пожара (плотности теплового потока для всех направлений и силы ветра, избыточного давления взрыва и импульса фазы сжатия) от расстояния до технологического оборудования, графики вероятности поражения людей во всех сценариях.

Все указанное дает возможность провести глубокий анализ пожарной опасности используемого технологического оборудования, а также разработать мероприятия, направленные на снижение пожарной опасности объекта и обеспечение требуемого уровня пожарной безопасности для людей: как работников предприятия, так и населения на прилегающей территории.

В соответствии с критериями ущерба/поражения, при интенсивности теплового излучения $37,5 \text{ кВт/м}^2$ в пределах 40,25 метров от интересующей точки до центра пожара пролива оборудование и здания могут быть полностью уничтожены, а люди погибнут в течение одной минуты [20]. При заданных условиях моделирования интенсивность теплового излучения составляет $24,8 \text{ кВт/м}^2$, а радиус поражения составляет 28,46 метра, что может вызвать повреждение соседних 5 резервуаров (306, 307, 315, 317, 318) и трубопроводов между резервуарами для хранения, а также вызвать вторичный пожар и взрыв.

Последствия аварии на нефтеперерабатывающем заводе в Адене очень серьезны. Полученные результаты имеют важное значение применительно к изучению закономерностей распространения пожаров, оценке их воздействия на окружающую среду и безопасному проектированию резервуаров для хранения.

Библиографический список

1. Al-Maitami M. Call to Resume Donor Support to Yemen // Yemen Socio-Economics Update. 2016. Issue 16. Pp. 1-6.
2. Energy Investment and Business Climate Report for Observer Countries the Republic of Yemen / T. Sufian,

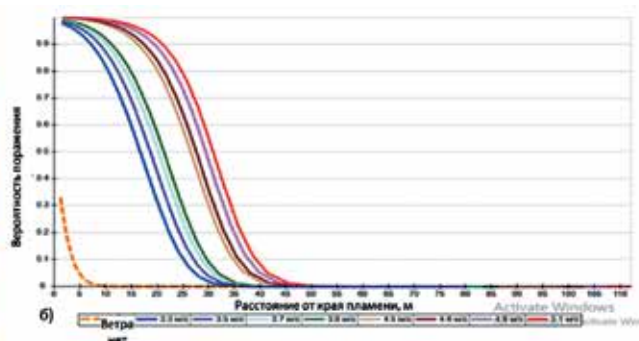
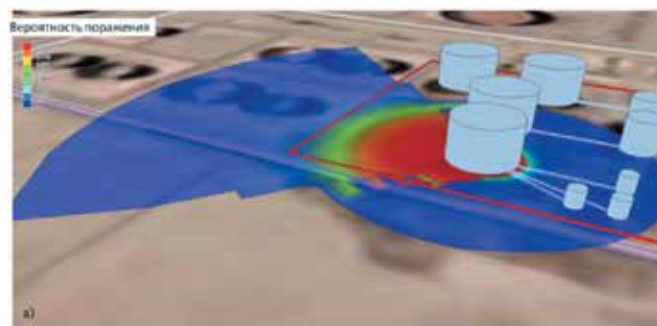


Рис. 7. а) – значения условных вероятностей поражения человека тепловым излучением на различных расстояниях от края зоны пожара; б) – график зависимости условной вероятности поражения человека от расстояния от края пожара для всех приведенных вариантов силы ветра

C. Ogutcu, M. Barra: Retrieved from Energy Charter Secretariat. 2017. 53 p. URL: https://energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Occasional/Yemen_Investment_Report.pdf (дата обращения: 17.04.2023).

3. Household Energy Supply and Use in Yemen: Volume I, Main Report. 2005. Dec. URL: https://www.esmap.org/sites/default/files/esmap-files/FR315-05_YEMEN_Household_Energy_Supply_Use_vol1.pdf (дата обращения: 17.04.2023).

4. Yemen Extractive Industries Transparency Initiative (YEITI) Second Reconciliation. Final Report. 2013. June, 30th. URL: <https://s3.amazonaws.com/rgi-documents/fa1011b859e6d7bb2094b4a296803139d595d960.pdf> (дата обращения: 17.04.2023).

5. Is an ageing oil tanker threatening an environmental disaster off the coast of Yemen? / Conflict and Environment Observatory. 2018. May, 15th. URL: <https://ceobs.org/is-an-ageing-oil-tanker-threatening-an-environmental-disaster-off-the-coast-of-yemen/> (дата обращения: 17.04.2023).

6. Краснов А.В., Садыкова З.Х., Пережогин Д.Ю. и др. Статистика чрезвычайных происшествий на объектах нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности за 2007–2016 гг. // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2017. № 6. С. 179-191. URL: http://ogbus.ru/files/ogbus/issues/6_2017/ogbus_6_2017_p179-191_KrasnovAV_ru.pdf (дата обращения: 01.05.2023)

7. Morvan M., L'Hégaret P., Carton X. et al. Life cycle of mesoscale eddies in the Gulf of Aden Geophys // Ocean Science. 2019. Vol. 15. No. 6. Pp. 1531-1543.

8. Connelly C. Will Yemen Be a Gas Exporter Again? / The Arab Gulf States Institute in Washington. 2020. Mar, 10th. URL: <https://agsi.w.org/will-yemen-be-a-gas-exporter-again/> (дата обращения: 17.04.2023).

9. Sufian T. Post Conflict Reconstruction Strategy Study for the Electricity and Energy Sector of Yemen / International Energy Charter: Energy Charter Secretariat Knowledge Center, 2019. 84 p. URL: https://www.energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Occasional/2019-Yemen_paper_final.pdf (дата обращения: 17.04.2023).

10. Watch: Violent explosion shakes Yemen's Aden refineries, massive fire breaks out / Alarabiya News. 2019. Jan, 11th. URL: <https://english.alarabiya.net/en/News/gulf/2019/01/11/Violent-explosion-shakes-Yemen-s-Aden-refineries-breaks-out-massive-fire> (дата обращения: 17.04.2023).

11. Explosion sparks fire at Aden refinery, cause unknown / Middle East Affairs. URL: http://arabic.news.cn/2019-01/13/c_137739312_5.htm (дата обращения: 01.05.2023).

12. Srivastava A., Gupta J.P. New methodologies for security risk assessment of oil and gas industry // Process Safety and Environmental Protection. 2010. Vol. 88. No. 6. Pp. 407–412.

13. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах (утв. приказом МЧС России от 10.07.2009 № 404, с изм.). URL: http://www.fireevacuation.ru/files/prikaz_404.pdf (дата обращения: 17.04.2023)

14. Кокорин В.В., Субачев С.В. Применение программного обеспечения PROMRISK при моделировании аварии на АЗС // Техносферная безопасность. 2018. № 4(21). С. 82-87.

15. Руководство пользователя PromRisk. URL: https://www.pyrosim.ru/download/PromRisk_manual.pdf (дата обращения: 17.04.2023).

16. Гордиенко Д.М. Пожарная безопасность особо опасных и технически сложных производственных объектов нефтегазового комплекса: автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.26.03 / Гордиенко Денис Михайлович ; ФГБУ «Всероссийский ордена «Знак Почета» научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС России. М., 2004. – 48 с. : ил. Библиогр. : с. 35. URL: <https://academygps.ru/upload/iblock/83e/83e404c-3baaf11a6dec4af7587e8721b.pdf> (дата обращения: 17.04.2023).

17. Галеев А.Д., Поникаров С.И. Анализ риска аварий на опасных производственных объектах. Казань: Казанский национальный исследовательский технологический университет, 2017. 152 с.

18. Fleury R. Evaluation of Thermal Radiation Models for the Propagation of Fire between Objects: Master Thesis in Fire Engineering / Faculty of Civil and Natural Resources, University of Canterbury. Christchurch, New Zealand, 2010.

19. Labovská Z., Labovský J. Estimation of thermal effects on receptor from pool fires // Acta Chimica Slovaca. 2016. Vol. 9. No. 2. Pp. 169–179.

20. Zhang M., Song W., Wang J. et al. Accident consequence simulation analysis of pool fire in fire dike // Procedia Engineering. 2014. Vol. 84. Pp. 565–577.

References

1. Al-Maitami M. Call to Resume Donor Support to Yemen. *Yemen Socio-Economics Update* 2016;16:1-6.

2. Sufian T., Ogutcu C., Barra M. Energy Investment and Business Climate Report for Observer Countries the Republic of Yemen. In: Energy Charter Secretariat; 2017. (accessed: 17.04.2023). Available at: https://energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Occasional/Yemen_Investment_Report.pdf.

3. Household Energy Supply and Use in Yemen: Volume I, Main Report; 2005. Dec. (accessed: 17.04.2023). Available at: https://www.esmap.org/sites/default/files/esmap-files/FR315-05_YEMEN_Household_Energy_Supply_Use_vol1.pdf.

4. Yemen Extractive Industries Transparency Initiative (YEITI) Second Reconciliation. Final Report. 2013. June, 30th. (accessed 17.04.2023). Available at: <https://s3.amazonaws.com/rgi-documents/fa1011b859e6d7bb2094b4a296803139d595d960.pdf>.

5. Is an ageing oil tanker threatening an environmental disaster off the coast of Yemen? Conflict and Environment Observatory; 2018. (accessed 17.04.2023). Available at: <https://ceobs.org/is-an-ageing-oil-tanker-threatening-an-environmental-disaster-off-the-coast-of-yemen/>.

6. Sustainable Development Strategy of the Company About the Company Corporate Governance Operating Results Information for Shareholders and Investors. (accessed 04.12.2020). Available at: www.rosneft.com.

7. Morvan M., L'Hégaret P., Carton X. et al. Life cycle of mesoscale eddies in the Gulf of Aden Geophys. *Ocean Science* 2019;15(6):1531-1543.

8. Connelly C. Will Yemen Be a Gas Exporter Again? The Arab Gulf States Institute in Washington; 2020. Mar, 10th. (accessed 17.04.2023). Available at: <https://agsiw.org/will-yemen-be-a-gas-exporter-again/>.

9. Sufian T. Post Conflict Reconstruction Strategy Study for the Electricity and Energy Sector of Yemen. International Energy Charter: Energy Charter Secretariat Knowledge Center; 2019. (accessed 04.2023). Available at: https://www.energycharter.org/fileadmin/DocumentsMedia/Occasional/2019-Yemen_paper_final.pdf.

10. Watch: Violent explosion shakes Yemen's Aden refineries, massive fire breaks out. Alarabiya News; 2019. Jan, 11th. (accessed: 17.04.2023). Available at: <https://english.alarabiya.net/en/News/gulf/2019/01/11/Violent-explosion-shakes-Yemen-s-Aden-refineries-breaks-out-massive-fire>.

11. Explosion sparks fire at Aden refinery, cause unknown. Middle East Affairs. (accessed 01.05.2023). Available at: http://arabic.news.cn/2019-01/13/c_137739312_5.htm.

12. Srivastava A., Gupta J.P. New methodologies for security risk assessment of oil and gas industry. *Process Safety and Environmental Protection* 2010;88(6):407-412.

13. [Method for defining target values of fire hazard in manufacturing facilities (approved by order of EMERCOM of Russia dated 10.07.2009 no. 404, as amended)]. (accessed 17.04.2023). Available at: http://www.fireevacuation.ru/files/prikaz_404.pdf.

14. Kokorin V.V., Subachev S.V. Application of the PROMRISK software for simulating accidents at gas stations. *Technosphere safety* 2018;4(21): С. 82-87. (in Russ.)

15. PromRisk user guide. (accessed 17.04.2023). Available at: https://www.pyrosim.ru/download/PromRisk_manual.pdf.

16. Gordienko D.M. [Fire safety of highly dangerous and technically complex industrial facilities of the oil and gas industry: abstract of a Doctor of Engineering thesis: 05.26.03. ФГБУ All-Russian Badge of Honour Research Institute of Fire Defence of the EMERCOM of Russia. Moscow; 2004. (accessed 17.04.2023). Available at: <https://academygps.ru/upload/iblock/83e/83e404c3baaf11a6de-c4af7587e8721b.pdf>.

17. Galiaev A.D., Ponikarov S.I. [Analysis of the risk of accidents at hazardous manufacturing facilities]. Kazan: Kazan National Research Technological University; 2017. (in Russ.)

18. Fleury R. Evaluation of Thermal Radiation Models for the Propagation of Fire between Objects: Master Thesis in Fire Engineering. Faculty of Civil and Natural Resources, University of Canterbury. Christchurch, New Zealand; 2010.

19. Labovská Z., Labovský J. Estimation of thermal effects on receptor from pool fires. *Acta Chimica Slovaca* 2016;9(2):169-179.

20. Zhang M., Song W., Wang J. et al. Accident consequence simulation analysis of pool fire in fire dike. *Procedia Engineering* 2014;84:565-577.

Сведения об авторах

Аль-Раухани Нор Аддин Мохаммед Ахмед – аспирант (3 курс, специальность 08.06.01 Техника и технологии строительства) кафедры систем автоматизированного проектирования объектов строительства Институт строительства и архитектуры ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», ул. Мира, д. 19, г. Екатеринбург, Свердловская область, Российская Федерация, 620002, e-mail: Nal-raukhani@urfu.ru.

Алехин Владимир Николаевич – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедры систем автоматизированного проектирования объектов строительства Институт строительства и архитектуры ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», ул. Мира, д. 19, г. Екатеринбург, Свердловская область, Российская Федерация, 620002.

About the authors

Al-Rawhani Nor Addin Mohammad Ahmed, Post-graduate Student (3-rd year, program 08.06.01 Construction Technology and Processes), Department of Automated Design Systems in Construction, Institute of Civil Engineering and Architecture, Ural Federal University, 19 Mira st., 620002, Yekaterinburg, Sverdlovsk Oblast, Russian Federation, e-mail: Nal-raukhani@urfu.ru.

Vladimir N. Alekhin, Candidate of Engineering, Professor, Head of Department of Automated Design Systems in Construction, Institute of Civil Engineering and Architecture, Ural Federal University, 19 Mira st., 620002, Yekaterinburg, Sverdlovsk Oblast, Russian Federation.

Вклад авторов в статью

Аль-Раухани Н.М. – формулировка и развитие ключевых целей и задач, сбор, анализ и интерпретация исходных данных, разработка методологии исследования, создание моделей, проведение статистического анализа.

Алехин В.Н. – научное руководство работой, критический пересмотр рукописи с внесением ценного замечания интеллектуального содержания, участие в научном дизайне, подготовка окончательной версии работы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Анализ погрешностей прогноза для интеллектуальных систем управления и предиктивной диагностики

Prediction error analysis for intelligent management and predictive diagnostics systems

Баранов Л.А.^{1*}, Балакина Е.П.¹, Юнцян Чжан¹
Baranov L.A.^{1*}, Balakina E.P.¹, Yungqiang Zhang¹

¹ Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация

¹Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation

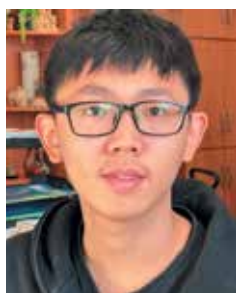
*baranov.mii@gmail.com



Баранов Л.А.



Балакина Е.П.



Юнцян Чжан

Резюме. Использование прогноза случайных сигналов эффективно в интеллектуальных системах управления и предиктивной диагностики. **Цель.** Целью данной статьи является анализ погрешности прогноза случайных сигналов. Разработка рекомендаций выбора параметров экстраполяторов случайных сигналов. **Методы.** Используется математический аппарат теории случайных функций, формализация, принятая в теории импульсных систем, математическое описание экстраполяторов многочленами Чебышева ортогональными на множестве равноотстоящих точек. Коэффициенты прогнозирующего многочлена выбираются по минимуму наименьших квадратов. **Результаты.** Описана математическая модель экстраполятора. Получены расчетные соотношения оценок погрешностей прогноза. Определены максимальная и усредненная по интервалу прогноза относительная среднеквадратическая погрешности экстраполяции. Анализируются погрешности экстраполяции случайных процессов, заданных суммой центрированного стационарного случайного процесса и детерминированной функцией времени. На базе многовариантных расчетов проведены рекомендации, позволяющие выбрать параметры экстраполятора (степень экстраполирующего многочлена, число точек измерения, предшествующих отрезку, на котором осуществляется прогноз, шаг дискретизации прогнозируемой функции) при заданных моделях входных сигналов. **Заключение.** Использование экстраполяторов на базе многочленов Чебышева, ортогональных на множестве равноотстоящих точек, и метода наименьших квадратов позволяет реализовать процедуру расчета прогнозируемых значений случайного процесса с требуемой точностью. При заданных моделях прогнозирующего сигнала разработана методика, позволяющая выбирать параметры экстраполятора (порядок, число точек, участвующих в формировании прогноза, шаг временной дискретизации) для обеспечения требуемой точности.

Abstract. Random signal prediction is efficient for intelligent management and predictive diagnostics systems. **Aim.** The paper aims to analyse the error of random signal prediction. To develop recommendations for the selection of random signal extrapolator parameters. **Methods.** The paper uses the mathematics of the theory of random functions, formalization adopted in the theory of pulse systems, mathematical description of extrapolators with Chebyshev polynomials orthogonal over a set of equally spaced points. The coefficients of the predicting polynomial are selected according to the minimal least squares. **Results.** The paper describes the mathematical model of the extrapolator. Design ratios were obtained for prediction error assessments. The maximum and prediction interval-averaged relative mean square error of extrapolation were defined. The authors analyse the error of extrapolation of random processes defined by the sum of a centred stationary random process and a deterministic time function. Based on diverse calculations, recommendations were defined that allow selecting the parameters of the extrapolator (degree of the extrapolating polynomial, number of test points that precede the prediction interval, discretisation interval of the predicting function) under the specified input signal models. **Conclusion.** The use of extrapolators based on Chebyshev polynomials orthogonal on a set of equally spaced points and the least square method allows implementing a procedure for calculating predicted values of a random process with the required accuracy. Under the specified models of the predicting signal, a method was developed that allows selecting the extrapolator's parameters (order, number of points involved in the generation of the prediction, sample spacing) for the purpose of ensuring the required accuracy.

Ключевые слова: автокорреляционная функция, метод наименьших квадратов, многочлены Чебышева, прогноз, экстраполяция, погрешность прогноза, случайный процесс, шаг временной дискретизации.

Keywords: autocorrelation wavelet, least square method, Chebyshev polynomials, prediction, extrapolation, prediction error, random process, sample spacing.

Для цитирования: Баранов Л.А., Балакина Е.П., Юнцян Чжан. Анализ погрешностей прогноза для интеллектуальных систем управления и предиктивной диагностики // Надежность. 2023. №2. С. 12-18. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-2-12-18>

For citation: Baranov L.A., Balakina E.P., Yungqiang Zhang. Prediction error analysis for intelligent management and predictive diagnostics systems. Dependability 2023;2: 12-18. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-2-12-18>

Поступила: 23.03.2023 / **После доработки:** 24.04.2023 / **К печати:** 15.06.2023

Received on: 23.03.2023 / **Revised on:** 24.04.2023 / **For printing:** 15.06.2023

Введение

Экстраполяторы эффективны при использовании в системах с обратной связью как составная часть оператора, преобразующего величину рассогласования в управление [1], в централизованных интеллектуальных системах управления движением поездов метрополитена для прогноза величины случайных возмущений задержки поезда до его прибытия на станцию при расчете управления верхнего уровня, определяющего момент отправления и задаваемое время хода сзади идущего поезда с целью обеспечения его движения без ограничения скорости системами обеспечения безопасности [2].

При известном синдроме состояния объекта и наличии точной информации об измененном сигнале, определяющем величину, характеризующую текущее состояние объекта, экстраpolator, работающий в реальном времени, позволяет реализовать процедуру прогноза состояния объекта, что является важнейшей составляющей системы предиктивной диагностики [3]. Модели экстраполяторов, работающие в реальном времени, алгоритмы их функционирования, методика анализа величин погрешностей прогноза при случайных и детерминированных входных сигналах изложены в работах [4], [5]. В [4], [5], [6] рассматриваются экстраполяторы, величина прогноза в которых рассчитывается по предыдущим значениям измеряемых величин. Прогноз вычисляется с использованием многочленов, ортогональных на множестве равноотстоящих точек (многочлены Чебышева, Кравчука).

В данной статье на базе многовариантных расчетов приведены рекомендации, позволяющие выбирать параметры экстраполятора (степень экстраполирующего многочлена, число точек измерения, предшествующих отрезку, для которого осуществляется прогноз, шаг временной дискретизации прогнозируемой функции) при заданных моделях входных сигналов. Анализируются экстраполяторы, построенные на многочленах Чебышева, ортогональных на множестве равноотстоящих точек, коэффициенты которых вычисляются по методу наименьших квадратов.

Математическая модель экстраполятора на базе многочленов Чебышева

Пусть $x[nT]$ – случайный процесс, значения которого известны в $(M+1)$ -й точке $(n-M+i)T$, $i=0,1,2,\dots,M$, $n=\dots,-2,-1,0,1,2,\dots$ – номер текущей точки на временной

оси, T – шаг временной дискретизации. Если t – текущее время, то $\frac{t}{T} = n + \epsilon$, где $0 \leq \epsilon \leq 1$.

Процедура прогноза позволяет вычислить в момент времени $t=nT$ значение функции при $t > nT$, в частности, в любой точке интервала от nT до $(n+1)T$ по известным значениям $x(t)$ в точках $(n-M+i)T$, $i=0,1,2,\dots,M$.

Функция $z[(n+\epsilon)T]$, $0 \leq \epsilon \leq 1$ является результатом экстраполяции $x(t)$ по известным значениям $x[(n-M+i)T]$, $i=0,1,2,\dots,M$ многочленом степени $l \geq M$, $M=0,1,2,\dots$. В случае, когда $l=M$, значения экстраполирующего многочлена в точках $t=(n-M+i)T$ совпадают со значениями функции $x[(n-M+i)T]$. Коэффициенты многочлена в этом случае вычисляются по формуле Лагранжа [4, 5].

При $M > l$ вычисление результата прогноза (функция $z[(n+\epsilon)T]$ определяется как линейная комбинация многочленов $\varphi_0(t), \varphi_1(t), \dots, \varphi_l(t)$, ортогональных на множестве равноотстоящих точек. Интервал измеренных значений $x(t)$ от t_0 до t_M преобразуем в интервал от 0 до MT , а точки $t_0, t_1, \dots, t_M$ в $i=0,1,\dots,M$ заменой переменных $\bar{t} = \frac{t-t_0}{T}$. Условие ортогональности многочленов на множестве равноотстоящих точек определяется выражением

$$\sum_{i=0}^M \varphi_{k,M}(\bar{t}) \varphi_{r,M}(\bar{t}) = 0 \text{ при } k \neq r, \quad (1)$$

где k, r – соответственно степени многочленов $\varphi_{k,M}(\bar{t})$ и $\varphi_{r,M}(\bar{t})$.

Многочлен $z[(n+\epsilon)T]$ определяется следующим выражением

$$z(\bar{t}) = \sum_{j=0}^l c_j \cdot \varphi_{j,M}(\bar{t}), \quad (2)$$

где c_j – коэффициенты аппроксимации.

Порядком экстраполятора l будем называть степень многочлена $z(\bar{t})$. Коэффициенты c_j выбираются по критерию минимума среднеквадратической погрешности Δ^2 , определяющей близость функции $x(t_i)$ и $z(t_i)$:

$$\begin{aligned} \Delta^2 &= \frac{1}{M+1} \sum_{i=0}^M [x(iT) - z(iT)]^2 = \\ &= \frac{1}{M+1} \sum_{i=0}^M \left[x[(n-M+i)T] - \sum_{j=0}^l c_j \cdot \varphi_{j,M}(i) \right]^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Приравняв нулю производную $d\Delta^2/dc_j$, с учетом (3) получаем:

$$c_j = \frac{\sum_{i=0}^M x[(n-M+i)T] \varphi_{j,M}(i)}{\sum_{i=0}^M \varphi_{j,M}^2(i)}. \quad (4)$$

Подставив (4) в (2), получаем результат экстраполяции

$$\begin{aligned} Z[(n+\varepsilon)T] &= \\ &= \sum_{j=0}^l \left[\frac{\sum_{i=0}^M x[(n-M+i)T] \varphi_{j,M}(i)}{\sum_{i=0}^M \varphi_{j,M}^2(i)} \varphi_{j,M}(M+\varepsilon) \right] = \\ &= \sum_{i=0}^M x[(n-M+i)T] \sum_{j=0}^l \frac{\varphi_{j,M}(i) \varphi_{j,M}(M+\varepsilon)}{\sum_{i=0}^M \varphi_{j,M}^2(i)} = \\ &= \sum_{i=0}^M x[(n-M+i)T] L_i^{\varepsilon, \text{KB}, l}[0, \varepsilon], \end{aligned} \quad (5)$$

где

$$L_i^{\varepsilon, \text{KB}, l}[0, \varepsilon] = \sum_{j=0}^l \frac{\varphi_{j,M}(i) \varphi_{j,M}(M+\varepsilon)}{\sum_{i=0}^M \varphi_{j,M}^2(i)}. \quad (6)$$

Как следует из (6), при увеличении порядка экстраполятора с l на $l+1$

$$L_i^{\varepsilon, \text{KB}, l+1}[0, \varepsilon] = L_i^{\varepsilon, \text{KB}, l}[0, \varepsilon] + \frac{\varphi_{l+1,M}(i) \varphi_{l+1,M}(M+\varepsilon)}{\sum_{i=0}^M \varphi_{l+1,M}^2(i)}. \quad (7)$$

Многочлены Чебышева $\varphi_{j,M}(\bar{t})$, следуя [7], получаем из следующего рекуррентного соотношения:

$$\begin{aligned} \bar{t} \varphi_{j,M}(\bar{t}) &= -\frac{(j+1)(M-j)}{2(2j+1)} \varphi_{(j+1),M}(\bar{t}) + \\ &+ \frac{M}{2} \varphi_{j,M}(\bar{t}) - \frac{j(M+j+1)}{2(2j+1)} \varphi_{(j-1),M}(\bar{t}), \end{aligned} \quad (8)$$

при

$$\varphi_{0,M}(\bar{t}) = 1, \varphi_{1,M}(\bar{t}) = 1 - \frac{2\bar{t}}{M}.$$

В табл. 1 приведены выражения $\varphi_{0,M}(\bar{t})$, $\varphi_{1,M}(\bar{t})$, $\varphi_{2,M}(\bar{t})$, $\varphi_{3,M}(\bar{t})$ и $\sum_{i=0}^M \varphi_{j,M}^2(i)$, рассчитанные в соответствии с (8) [4,5].

Табл. 1

Обозначение	Многочлены
$\varphi_{j,M}(\bar{t})$	$\sum_{k=0}^j \left[\frac{(-1)^k C_j^k C_{j+k}^k \prod_{r=0}^{k-1} (\bar{t}-r)}{\prod_{r=0}^{k-1} (M-r)} \right]$
$\varphi_{0,M}(\bar{t})$	1
$\varphi_{1,M}(\bar{t})$	$1 - \frac{2\bar{t}}{M}$
$\varphi_{2,M}(\bar{t})$	$1 - \frac{6\bar{t}}{M-1} + \frac{6\bar{t}^2}{M(M-1)}$
$\varphi_{3,M}(\bar{t})$	$\frac{(M-2\bar{t})}{M(M-1)(M-2)} \left[10\bar{t}^2 - 10M\bar{t} + \right]$ $\left[+ (M-1)(M-2) \right]$

Обозначение	Многочлены
$\sum_{i=0}^M \varphi_{j,M}^2(i)$	$\frac{(j+M+1)!(M-j)!}{(2j+1)M!^2}$

После подстановки в (6) соответствующих многочленов Чебышева, приведенных в табл. 1, получаем

$$\begin{aligned} L_i^{\varepsilon, \text{KB}, l}[0, \varepsilon] &= \\ &= \sum_{j=0}^l \frac{(2j+1)(M!)^2}{(M-j)!(j+M+1)!} \varphi_{j,M}(i) \varphi_{j,M}(M+\varepsilon). \end{aligned} \quad (9)$$

Выражения $L_i^{\varepsilon, \text{KB}, l}[0, \varepsilon]$ для экстраполяции нулевого, первого и второго порядка сведены в табл. 2 [5].

Табл. 2

l	$L_i^{\varepsilon, \text{KB}, l}[0, \varepsilon]$
0	$\frac{1}{M+1}$
1	$\frac{2(M^2 - M + 3M\varepsilon - 3Mi - 6\varepsilon i)}{M(M+1)(M+2)}$
2	$\frac{2(M^2 - M + 3M\varepsilon - 3Mi - 6\varepsilon i)}{M(M+1)(M+2)} -$ $-\frac{5(6\varepsilon(M+\varepsilon) + M(M-1))(6i(M-i) - M(M-1))}{M(M-1)(M+1)(M+2)(M+3)}$

При $M=l$ результаты прогноза совпадают с результатами, полученными при использовании формулы Лагранжа [4, 5].

Анализ прогноза при случайном входном сигнале. Выбор параметров экстраполятора

В качестве моделей входного сигнала рассмотрим стационарные центрированные случайные процессы с различными автокорреляционными функциями:

– процесс с постоянной спектральной плотностью в полосе частот от 0 до ω_0 и равной 0 вне этой полосы

$$R_{xx}(\tau) = G_x^2 \frac{\sin \omega_0 \tau}{\omega_0 \tau} = G_x^2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m (\omega_0 \tau)^{2m}}{(2m+1)!}; \quad (10)$$

– процесс, спектральная плотность мощности которого убывает с ростом частоты

$$R_{xx}(\tau) = G_x^2 e^{-\alpha^2 \tau^2} = G_x^2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m (\alpha \tau)^{2m}}{m!}; \quad (11)$$

– гармонический сигнал со случайной равномерно распределенной фазой

$$R_{xx}(\tau) = G_x^2 \cos \beta \tau = G_x^2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{(-1)^m (\beta \tau)^{2m}}{(2m)!}. \quad (12)$$

В выражениях (10), (11), (12) $G_x^2 = R_{xx}(0)$ – дисперсия случайного процесса; α – показатель, определяющий уменьшение автокорреляционной функции с ростом τ и, следовательно, уменьшение спектральной плотности мощности этого процесса с ростом ω ; β – частота гармонического процесса со случайной фазой.

В том случае, когда для экстраполяции используется $M+1$ точка при шаге временной дискретизации, равном T , временной интервал, используемый для прогноза, равен MT и коэффициент корреляции $k_{кор}$ между случайными величинами в момент $(n-M)T$ и nT равен

$$k_{кор} = \frac{R_{xx}(MT)}{R_{xx}(0)}, \quad (13)$$

где $R_{xx}(MT)$ определяется из (10), (11), (12) при $\tau=MT$.

Приведенные выражения не исчерпывают всего многообразия автокорреляционных функций, однако они позволяют проиллюстрировать методику анализа погрешностей и выбора параметров экстраполятора.

Линейная комбинация этих $R_{xx}(\tau)$ позволяет аппроксимировать множество автокорреляционных функций, встречающихся в технических приложениях [4, 5].

Погрешность экстраполяции на интервале от nT до $(n+1)T$ определяется выражением

$$\begin{aligned} \theta[n, \varepsilon] &= x[(n+\varepsilon)T] - z[(n+\varepsilon)T] = \\ &= x[(n+\varepsilon)T] - \sum_{i=0}^M L_i^{3,l}[0, \varepsilon] \cdot x[(n-M+i)T]. \end{aligned} \quad (14)$$

При случайном стационарном центрированном входном сигнале дисперсия погрешности прогноза [4], [5]:

$$\overline{\theta^2}[n, \varepsilon] = \text{Mat} \{ x[(n+\varepsilon)T] - z[(n+\varepsilon)T] \}^2, \quad (15)$$

где Mat – знак математического ожидания квадрата погрешности.

Из (15) следует [4], [5]:

$$\begin{aligned} \overline{\theta^2}[0, \varepsilon] &= R_{xx}(0) - 2 \sum_{i=0}^M L_i^{3,l}[0, \varepsilon] R_{xx}[(M-i+\varepsilon)T] + \\ &+ \sum_{i=0}^M \sum_{r=0}^M L_i^{3,l}[0, \varepsilon] L_r^{3,l}[0, \varepsilon] R_{xx}[(i-r)T]. \end{aligned} \quad (16)$$

Дисперсия погрешности зависит от ε , что определяется нестационарностью оператора, реализующего экстраполяцию. Разделив правую часть (16) на $R_{xx}(0)$, получаем

$$\begin{aligned} \overline{\delta^2}[0, \varepsilon] &= 1 - \frac{2}{R_{xx}(0)} \sum_{i=0}^M L_i^{3,l}[0, \varepsilon] R_{xx}[(M-i+\varepsilon)T] + \\ &+ \frac{1}{R_{xx}(0)} \sum_{i=0}^M \sum_{r=0}^M L_i^{3,l}[0, \varepsilon] L_r^{3,l}[0, \varepsilon] R_{xx}[(i-r)T], \end{aligned} \quad (17)$$

откуда относительные оценки среднеквадратической погрешности прогноза по отношению к среднеквадратическому значению входного сигнала определяется следующим образом:

$-\sqrt{\overline{\delta^2}[0, \varepsilon=1]} = \sqrt{\overline{\delta^2}}$ – максимальная среднеквадратическая погрешность;

$-\sqrt{\int_0^1 \overline{\delta^2}[0, \varepsilon] d\varepsilon} = \sqrt{\overline{\delta^2}}$ – усредненная на интервале экстраполяции среднеквадратическая погрешность.

После подстановки в (17) $R_{xx}(\tau)$ в форме степенных рядов, получаем

$$\overline{\delta^2}[0, \varepsilon] = \sum_{m=1}^{\infty} a_m [A_{2m}^3[0, \varepsilon] - 2B_{2m}^3[0, \varepsilon]], \quad (18)$$

где

$$a_m = \frac{R_{xx}^{(2m)}(0)}{R_{xx}(0)(2m)!} T^{2m},$$

$$A_{2m}^3[0, \varepsilon] = \sum_{i=0}^M \sum_{r=0}^M L_i^{3,l}[0, \varepsilon] L_r^{3,l}[0, \varepsilon] (i-r)^{2m};$$

$$B_{2m}^3[0, \varepsilon] = \sum_{i=0}^M L_i^{3,l}[0, \varepsilon] (M-i+\varepsilon)^{2m}.$$

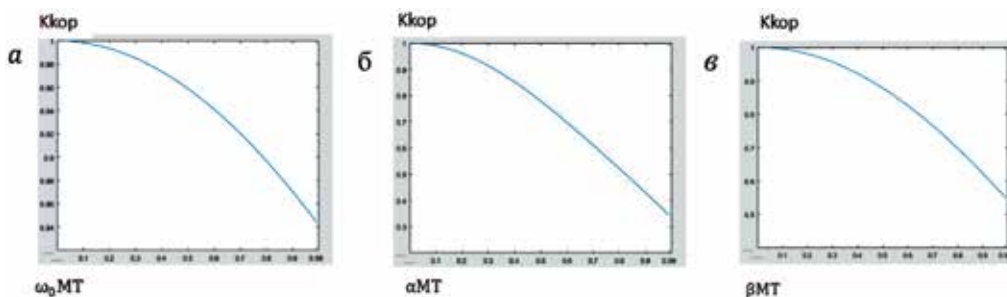
Выражения главного члена сходящегося ряда (17) сведены в табл. 3.

Величины оценок погрешностей рассчитываются при $0 < \omega_0 TM < 1$ для $R_{xx}(\tau)$, определяемой (10), $0 < \alpha TM < 1$ для $R_{xx}(\tau)$ определяемой (11), $0 < \beta TM < 1$ для $R_{xx}(\tau)$ определяемой (12).

Выбор диапазонов определяется приемлемой точностью вычисления погрешностей прогноза при использовании главного члена ряда, когда величины погрешностей не превышающую 40%, что соответствует возможности использования экстраполятора в технических приложениях. Величина M варьируется в диапазоне $l+1 \leq M \leq 100$. При $M=l$ получаем экстраполятор, использующий интерполяционную формулу Лагранжа [4]. Коэффициенты корреляции $k_{кор}$ между случайными величинами, находящимися на временной оси на расстоянии TM рассматриваются

Табл. 3

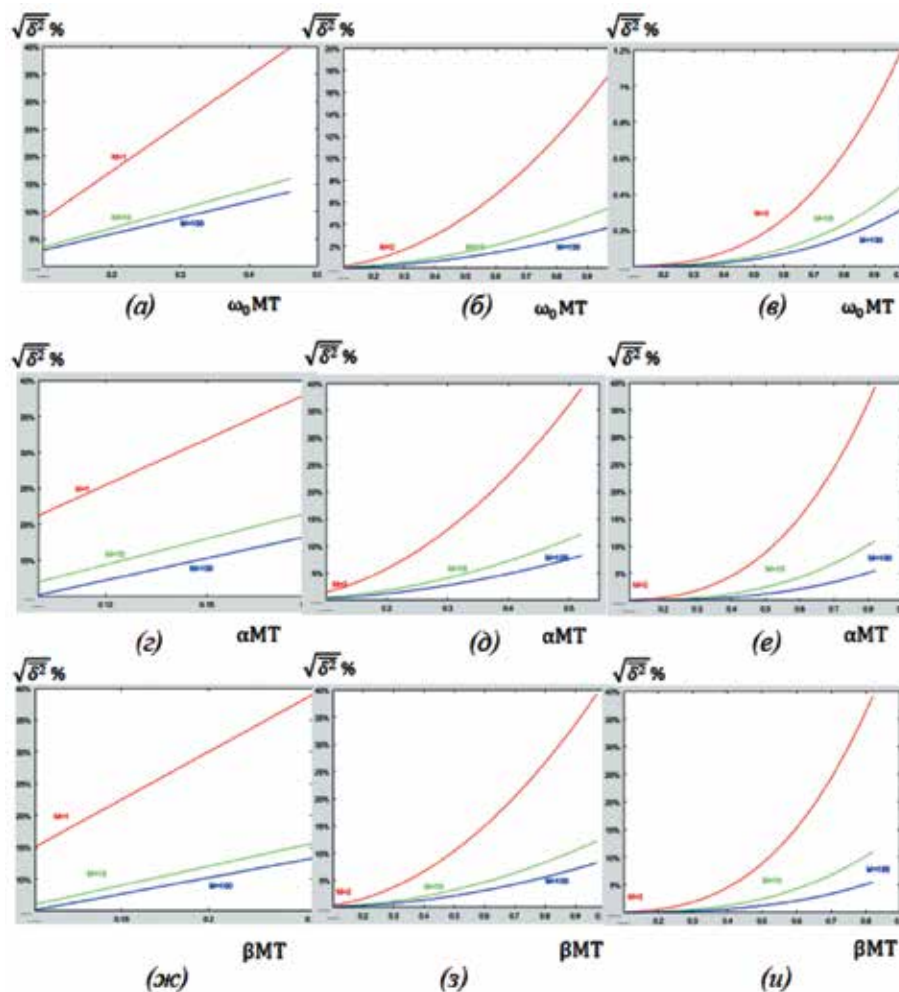
l	Главный член ряда $\overline{\delta^2}[0, \varepsilon]$	$\widetilde{\delta^2}$
0	$-\frac{a_1}{2}(M+2\varepsilon)^2$	$-a_1 \frac{3M^2+6M+4}{6}$
1	$\frac{a_2}{6}(M^2+6M\varepsilon-M+6\varepsilon^2)^2$	$a_2 \left(M^4+4M^3+11M^2+14M+\frac{36}{5} \right)$
2	$-\frac{a_3}{20}(M+2\varepsilon)^2(M^2+10M\varepsilon-3M+10\varepsilon^2+2)^2$	$-a_3 \left(\frac{M^6}{20} + \frac{3M^5}{10} + \frac{39M^4}{20} + \frac{29M^3}{5} + 11M^2 + \frac{56M}{5} + \frac{496}{105} \right)$


 Рис 1. Зависимости $k_{кор}$ от $\omega_0 TM$ (а), αTM (б), βTM (в)

в диапазонах $0,84 \leq k_{кор} < 1$ для (10), $0,3 \leq k_{кор} < 1$ для (11), $0,55 \leq k_{кор} < 1$ для (12). Увеличение TM приводит к увеличению погрешности прогноза. Зависимости $k_{кор}$ от $\omega_0 TM$, αTM и βTM приведены на рис. 1.

Результаты расчета оценок погрешностей $\sqrt{\delta^2}$ и $\sqrt{\delta^2}$ для экстраполятора нулевого ($l=0$), первого ($l=1$) и второго ($l=2$) порядков при моделях стационарного случайного входного сигнала, заданного автокорреляционными функциями (10), (11) и (12) приведены на рис. 2 для $\sqrt{\delta^2}$ и на рис. 3. для $\sqrt{\delta^2}$.

Полученные результаты позволяют при известной модели входного сигнала выбрать параметры экстраполятора (TM , M , l) таким образом, чтобы допустимая величина погрешности не превышала заданной, и имеют физически очевидную трактовку, показывающую уменьшение погрешности прогноза с ростом статистической связи между значениями прогнозируемой функции в точках начала и конца интервала TM , используемого для расчета. Выбор порядка экстраполяции ($l=0,1,2$) и числа точек ($M+1$), участвующих в вычислении прогноза, может быть осуществлен с помощью приведенных графических зависимостей.


 Рис 2. Зависимости $\sqrt{\delta^2}$ соответственно от $\omega_0 TM$ (а, б, в), αTM (г, д, е), βTM (ж, з, и), для экстраполяторов нулевого (а, б, в), первого (г, д, е), второго (ж, з, и) порядков

Особенности выбора параметров экстраполятора при нецентрированном случайном входном сигнале

Рассмотрим модель входного сигнала, заданной суммой центрированного стационарного случайного процесса $x(t)$ и детерминированной функцией $m_x(t)$, где m_x – математическое ожидание.

Операция экстраполяции, определяемая (5) линейна. Действительно,

$$\begin{aligned} z[(n+\varepsilon)T] &= \\ &= \sum_{i=0}^M L_i^{\alpha, \kappa \varepsilon, l} [0, \varepsilon] \{ x[(n-M+i)T] + m_x[(n-M+i)T] \} = \\ &= \sum_{i=0}^M L_i^{\alpha, \kappa \varepsilon, l} [0, \varepsilon] x[(n-M+i)T] + \\ &+ \sum_{i=0}^M L_i^{\alpha, \kappa \varepsilon, l} [0, \varepsilon] (m_x[(n-M+i)T]); \end{aligned}$$

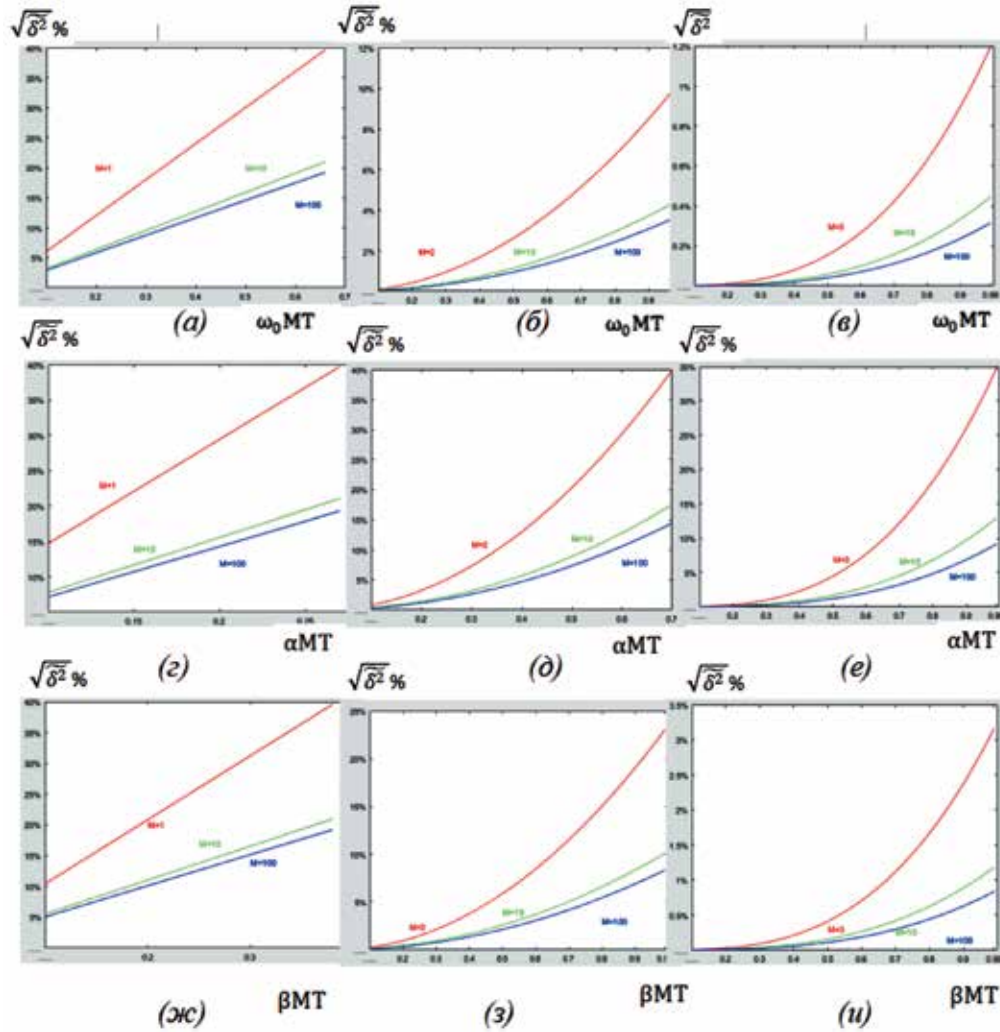


Рис 3. Зависимости $\sqrt{\delta^2}$ соответственно от $\omega_0 MT$ (а, б, в), αMT (г, д, е), βMT (ж, з, и), для экстраполяторов нулевого (а, б, в), первого (г, д, е), второго (ж, з, и) порядков

$$\begin{aligned} z[(n+\varepsilon)T] &= \sum_{i=0}^M L_i^{\varepsilon, K\varepsilon, l} [0, \varepsilon] c x[(n-M+i)T] = \\ &= c \sum_{i=0}^M L_i^{\varepsilon, K\varepsilon, l} [0, \varepsilon] x[(n-M+i)T]. \end{aligned}$$

Если на отрезке $(n-M)T \leq t \leq nT$ функция $m_x(t)$ задана многочленом степени l или меньше, то ее погрешность прогноза экстраполятором порядка l равна 0. В значительном числе приложений степень многочлена, задающего $m_x(t)$ на указанном отрезке, не превышает 2. В этом случае при выборе порядка экстраполятора, равном степени $m_x(t)$, погрешность прогноза математического ожидания равна 0. В иных случаях расчет погрешности прогноза выполняется по формуле (14).

Заключение

Прогноз случайных сигналов эффективно использовать в автоматических системах управления и предиктивной диагностики.

Прогноз величин случайных задержек поездов городского внеуличного транспорта на станциях позволяет реализовать алгоритмы централизованного управления на линии, минимизирующие вредное взаимодействие поездов через систему безопасности, что обеспечивает точное выполнение графика движения и минимизацию расхода энергии на тягу.

Использование экстраполяторов на базе многочленов Чебышева, ортогональных на множестве равноотстоящих точек, и метода наименьших квадратов позволяет реализовать процедуру расчета прогнозируемых значений случайного процесса с требуемой точностью.

При заданных моделях прогнозирующего сигнала разработана методика, позволяющая выбирать параметры экстраполятора (порядок, число точек, участвующих в формировании прогноза, шаг временной дискретизации) для обеспечения требуемой точности.

Библиографический список

1. Баранов Л.А., Пудовиков О.Е., Балакина Е.П. Влияние прогноза рассогласования на качество управления в

замкнутых автоматических системах // Электротехника. 2022. № 9. С. 8-15.

2. Баранов Л.А., Балакина Е.П., Иконников С.Е., Антонов Д.А. Централизованное управление движением поездов городских железных дорог современного мегаполиса // Наука и техника транспорта. 2020. № 1. С. 30-38.

3. Baranov L.A., Balakina E.P., Godyaev A.I. The object according state prediction to diagnostic data // Journal of Physics: Conference Series, Volume 2096, International Conference on Automatics and Energy (ICAE 2021) 7-8 October 2021, Vladivostok, Russia.

4. Баранов Л.А. Квантование по уровню и временная дискретизация в цифровых системах управления. М.: Энергоатомиздат, 1990. 304 с.

5. Баранов Л.А., Балакина Е.П. Прогнозирование случайных процессов на базе многочленов, ортогональных на множестве равноотстоящих точек // Электротехника. 2020. № 9. С. 39-45.

6. Баранов Л.А., Аршинов М.Н. Применение многочленов Кравчука для восстановления дискретизированного случайного сигнала методом наименьших квадратов // Межвузовский сборник научных трудов. М.: МИИТ, 1989. Вып. 811. С. 85-91.

7. Березин И.С., Жидков И.П. // Методы вычислений: Т.1. М.: Физматгиз, 1959. С.464.

References

1. Baranov L.A., Pudovikov O.E., Balakina E.P. [The effect of predicted disagreement on the quality of control in closed loop automatic control systems]. *Elektrotehnika* 2022;9:8-15. (in Russ.)

2. Baranov L.A., Balakina E.P., Ikonnikov S.E., Antonov D.A. Centralized train traffic operation of urban railways of a modern megalopolis. *Science and Technology in Transport* 2020;1:30-38. (in Russ.)

3. Baranov L.A., Balakina E.P., Godyaev A.I. The object according state prediction to diagnostic data. *Journal of Physics: Conference Series*, Volume 2096, International Conference on Automatics and Energy (ICAE 2021) 7-8 October 2021, Vladivostok, Russia.

4. Baranov L.A. [Level quantisation and time discretisation in digital control systems]. Moscow: Energoatomizdat; 1990. (in Russ.)

5. Baranov L.A., Balakina E.P. [Predicting random processes using polynomials orthogonal on the set of equally spaced points]. *Elektrotehnika* 2020;9:39-45.

6. Baranov L.A., Arshinov M.N. [Using the Krawchuk polynomial for regenerating a sampled random signal using the least square method]. In: [Interuniversity collection of science papers]. Moscow: MIIT; 1989;811:85-91. (in Russ.)

7. Berezin I.S., Zhidkov I.P. [Methods of calculation: Vol. 1]. Moscow: Fizmatgiz; 1959. (in Russ.)

Сведения об авторах

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

Балакина Екатерина Петровна — кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и защита информации», Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация, e-mail: balakina_e@list.ru

Юнцян Чжан – аспирант кафедры «Управление и защита информации». Закончил магистратуры по направлению 27.04.04 Управление в технических системах, Интеллектуальное управление в транспортных системах Российский университет транспорта, Москва, Российская Федерация, e-mail: zyuq0526@yandex.ru

About the authors

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

Ekaterina P. Balakina, Candidate of Engineering, Associate Professor, Department of Management and Protection of Information, Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation, e-mail: balakina_e@list.ru

Yungqiang Zhang, Postgraduate Student, Department of Management and Protection of Information. Graduated from the Master's degree program 27.04.04 Technical systems management, Intelligent management in transportation systems, Russian University of Transport, Moscow, Russian Federation, e-mail: zyuq0526@yandex.ru

Вклад авторов в статью

Баранов Л.А. Принципы построения и математическая модель экстраполяторов, случайных сигналов, работающих в реальном времени. Методика выбора параметров экстраполяторов.

Балакина Е.П. Погрешности прогноза экстраполяторов 0, 1 и 2 порядков

Юнцян Чжан. Расчет погрешности прогноза. Анализ результатов расчета погрешностей прогноза.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Отказы по общей причине: определения и типичные ошибки

Common cause failures: definitions and typical errors

Нетес В.А.

Netes V.A.

Московский технический университет связи и информатики, Москва, Российская Федерация
Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russian Federation
v.a.netes@mtuci.ru



Нетес В.А.

Резюме. Цель статьи – проанализировать определения понятия «отказы по общей причине», приведенные в различных международных и отечественных стандартах, и указать на их недостатки; выявить и разобрать типичные ошибки, возникающие при использовании этого понятия и учете таких отказов в расчетах надежности систем. Важность этой темы обусловлена тем, что такие отказы снижают эффект от резервирования и должны учитываться при проектировании систем, к которым предъявляются высокие требования по надежности. **Методы.** В статье дан сравнительный анализ определений отказов по общей причине, приведенных в отечественных и международных стандартах; проведен анализ методов учета влияния таких отказов, представленных в различных публикациях; применены методы теории вероятностей. **Результаты.** Выявлены расхождения между стандартами в определении понятия «отказы по общей причине» и недостатки, присущие некоторым из этих определений. Указаны типичные ошибки, имеющиеся в некоторых публикациях, касающиеся учета таких отказов. Наиболее детально рассмотрена самая простая и часто используемая при этом модель бета-фактора, указаны границы ее применения. **Выводы.** В различных стандартах целесообразно использовать единое определение отказов по общей причине, беря его из базового терминологического стандарта по надежности с соответствующей ссылкой, в самом термине и его определении слово «отказы» должно быть во множественном числе. Определения этого термина в ГОСТ EN 1070–2003 и ГОСТ 34332.3–2021 ошибочны, поскольку они совершенно не соответствуют содержанию определяемого понятия. Традиционная модель бета-фактора, предназначенная для учета отказов по общей причине при расчете вероятностей отказов, может использоваться только при малых значениях этих вероятностей.

Abstract. The Aim of the paper is to analyse the definitions of the term “common cause failures” given in various international and Russian standards and point out their shortcomings; to identify and analyse the typical errors in the use of this notion and consideration of such failures as part of system dependability calculation. The importance of the topic is due to the fact that such failures reduce the efficiency of redundancy and must be taken into account in the process of the design of systems with high dependability requirements.

Methods. The paper provides a comparative analysis of the definition of common cause failures given in Russian and international standards; analyses the methods of taking into account the effect of such failures presented in various publications; uses methods of the probability theory. **Results.** Differences between standards were identified in terms of the definition of the term “common cause failure”, as well as shortcomings of such definitions. Typical errors were pointed out in some publications dedicated to the methods of taking such failures into consideration. The simplest and most common beta-factor model was considered in most detail, the limits of its application were pointed out. **Conclusions.** It is advisable to use a single definition of common cause failures in different standards. It is to be taken from the basic terminological dependability standard with an appropriate reference. In the term itself and its definition, the word “failures” is to be in plural. The definition of this term in GOST EN 1070-2003 and GOST 34332.3-2021 are wrong, as they in no way correspond to the content of the defined notion. The conventional beta-factor model intended for taking into account common cause failures in the process of failure probability calculation can only be used in case of such probabilities being low.

Ключевые слова: расчет надежности систем, отказы по общей причине, стандарты, определения, типичные ошибки, модель бета-фактора.

Keywords: system dependability calculation, common cause failures, standards, definitions, typical errors, beta-factor model.

Для цитирования: Нетес В.А. Отказы по общей причине: определения и типичные ошибки // Надежность. 2023. №2. С. 19-25. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-2-19-25>
For citation: Netes V.A. Common cause failures: definitions and typical errors. Dependability 2023;2:19-25. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-2-19-25>

Поступила: 18.02.2023 / **После доработки:** 24.04.2023 / **К печати:** 15.06.2023
Received on: 18.02.2023 / **Revised on:** 24.04.2023 / **For printing:** 15.06.2023

Введение

При анализе надежности систем обычно делаются различные упрощающие предположения, которые облегчают решение задачи. Одним из них является предположение о том, что отказы различных элементов системы не зависят друг от друга. Однако это условие далеко не всегда имеет место, и в ряде ситуаций пренебрежение зависимостью отказов является недопустимым. Можно выделить два основных случая зависимости отказов.

Во-первых, возможна ситуация, когда отказ одного элемента влечет за собой отказ одного или нескольких других элементов. В качестве характерного примера можно привести события, случившиеся во время печально известного полета американского космического корабля «Аполлон-13», направлявшегося в 1970 году к Луне. Тогда отказ в одном из кислородных баков привел к выбросу из него струи кислорода, повредившей другое оборудование корабля, в частности, второй кислородный бак [1, 2]. В международной терминологии отказ, возникший в результате отказа другого объекта, называют вторичным (secondary), а отказ, не обусловленный прямо или косвенно отказом другого объекта, называют первичным (primary) [3]. В отечественной терминологии их называют соответственно зависимым и независимым [4].

Во-вторых, отказы нескольких элементов могут возникнуть вследствие какой-либо одной общей причины. Их так и называют: отказы по общей причине (ООП). Формальные определения таких отказов, имеющиеся в различных стандартах, будут приведены ниже. Если общей причиной является отказ какого-то элемента системы, то имеет место ситуация, описанная в предыдущем абзаце. Однако причина может быть и иной, в частности, лежать за пределами рассматриваемой системы. Например, проникновение влаги в некоторое устройство может привести к отказам нескольких его элементов.

Игнорирование зависимости отказов может приводить к грубым ошибкам при оценке надежности. Поэтому анализ ООП необходим при решении задач обеспечения надежности объектов ответственного назначения, в частности, систем безопасности [5]. Наиболее широко он применяется в атомной энергетике [6]. Этому способствовали расследование причин аварии на американской АЭС «Три Майл Айленд», происшедшей в 1979 году, и сделанные по его результатам выводы. Необходимость учета ООП в этой отрасли предписывается стандартами, нормативными документами

Ростехнадзора и МАГАТЭ. Конечно, ООП влияют на оценку надежности и в других отраслях. Например, еще в начале 1970-х стали учитывать одновременные отказы каналов связи при оценке надежности трактов передачи данных [7, 8] (термин ООП тогда еще не использовался, и в этих работах говорилось о коррелированных отказах). Достаточно общие математические модели для учета ООП стали разрабатываться в 1970-х и 1980-х годах.

Таким образом, правильное понимание соответствующих понятий и грамотный учет ООП являются весьма важными. К сожалению, в этой области далеко не все благополучно. Имеется множество разных определений ООП, не все из которых вполне корректны. В некоторых публикациях допущены ошибки в применении методов учета ООП при расчетах надежности и в интерпретации полученных результатов. Цель данной статьи – улучшить эту ситуацию. В ней анализируются определения ООП, приведенные в различных международных и отечественных стандартах, и разбираются типичные ошибки, связанные с ООП.

Определения отказов по общей причине

Существует довольно много различных определений ООП. Обзор таких определений в англоязычных источниках по состоянию на 2012 год был сделан в [2]. Здесь будет дан анализ определений ООП, приведенных в различных стандартах. С сожалением приходится констатировать, что эти определения различаются и не все из них корректны.

Определения ООП из различных международных и отечественных стандартов приведены соответственно в табл. 1 и табл. 2. При этом все рассмотренные отечественные стандарты разработаны с использованием международных или региональных (европейских) стандартов. Напомним, что в обозначениях идентичных стандартов соответствующий международный или региональный стандарт указан непосредственно после букв ГОСТ (для межгосударственных стандартов) или ГОСТ Р (для российских стандартов), в обозначениях модифицированных стандартов соответствующий международный стандарт указан в скобках после обычного обозначения межгосударственного или российского стандарта, для неэквивалентных стандартов соответствующий международный стандарт упомянут в предисловии к стандарту. Поэтому какие-то недостатки в наших стандартах могут быть обусловлены неточным переводом на русский язык.

Табл. 1. Определения ООП в международных стандартах

Стандарт	Определение	Примечание
IEC 60050-192:2015 [3]	Failures of multiple items, which would otherwise be considered independent of one another, resulting from a single cause. Отказы нескольких объектов, вызванные одной причиной, которые в противном случае считались бы независимыми друг от друга	Ссылки на это определение даны в IEC 60050-692:2017 и IEC 60050-821:2017
ISO 13849-1:2015	Failures of different items, resulting from a single event, where these failures are not consequences of each other. Отказы различных объектов, возникающие в результате одного события, в случае, когда эти отказы не являются следствиями друг друга	Сам термин в единственном числе, хотя в определении множественное число

Табл. 2. Определения ООП в отечественных стандартах

Стандарт	Определение	Примечание
ГОСТ Р 27.002–2009 (разработан с учетом основных нормативных положений IEC 60050-191:1990, не действует)	Отказы различных изделий или их составных частей, происходящие из-за одного события, если эти отказы не являются следствиями друг друга	Первый отечественный терминологический стандарт по надежности, в котором есть этот термин
ГОСТ 27.002–2015 (разработан с учетом IEC 60050-192:2015, не действует); ГОСТ Р 27.102–2021 [4]	Отказы различных объектов, возникающие вследствие одного события (отказа, ошибки персонала, внешнего или внутреннего воздействия), которые без рассмотрения причин считались бы независимыми	
ГОСТ Р 27.303–2021 (МЭК 60812:2018)	Отказы нескольких объектов, возникающие вследствие одного события, которые без рассмотрения причин считались бы независимыми	
ГОСТ ЕН 1070–2003 (идентичен европейскому стандарту EN 1070:98)	Отказ оборудования, вытекающий из единичного события, в тех случаях, когда этот отказ не является следствием другого отказа	В термине и в определении единственное число. Фактически определяет независимый отказ
ГОСТ Р МЭК 60880–2010, ГОСТ Р МЭК 60709–2011, ГОСТ Р МЭК 61226–2011	Отказ двух или более конструкций, систем или компонентов вследствие единичного конкретного события или единичной конкретной причины	В термине и в определении единственное число. Определения со ссылками на документы МАГАТЭ
ГОСТ Р МЭК 61508-4–2012	Отказ, являющийся результатом одного или нескольких событий, вызвавших одновременные отказы двух и более отдельных каналов в многоканальной системе, ведущих к отказу системы	В термине и в определении единственное число. Определение относится к частному случаю: отказ всей многоканальной системы
ГОСТ ISO 13849-1–2014	Повреждения разных частей машины, произошедшие в результате одного события и не являющиеся следствиями друг друга	Термин в единственном числе, хотя в определении множественное число. Говорится о повреждениях, а не об отказах
ГОСТ Р 57329–2016/ EN 13306:2010	Отказы разных элементов, возникающие в результате одного события, когда эти отказы не вытекают один из другого	
ГОСТ Р МЭК 61511-1–2018	Одновременные отказы разных устройств, вызванные одним событием, в котором эти отказы не являются последствиями друг друга	
ГОСТ Р МЭК 61513–2020	Отказ двух или более конструкций, систем и компонентов вследствие единичного события или причины	В термине и в определении единственное число
ГОСТ Р ИСО 26262-1–2020	Отказ двух или более элементов устройства в результате одного конкретного события или исходной причины, которая для всех этих элементов является внешней либо внутренней	В термине и в определении единственное число
ГОСТ 34332.3–2021 (учтены основные нормативные положения IEC 61508-2:2010, IEC 61508-4:2010, ISO/IEC Guide 51:2014)	Отказ оборудования, вызванный единичным событием в случаях, когда отказ не является следствием другого отказа	В термине и в определении единственное число. Фактически определяет независимый отказ

Первое, что бросается в глаза при взгляде на эти таблицы, это разнообразие определений. Такое положение нельзя считать нормальным. Подобная несогласованность подрывает доверие и уважение к стандартам, а также противоречит ГОСТ Р ИСО 10241-1-2013 [9]. Следует выработать единое определение, закрепить его базовым общетехническим терминологическим стандартом по надежности (они выделены в таблицах полужирным шрифтом), и в других стандартах приводить это же определение со ссылкой на базовый стандарт (в настоящее время это [3] и [4]). Как видно из табл. 1, именно так и поступили разработчики терминологических стандартов IEC 60050-692:2017 и IEC 60050-821:2017.

Во многих стандартах в самом термине ООП и его определении слово «отказ» стоит в единственном числе. Это противоречит базовым стандартам [3] и [4] и представляется нелогичным, поскольку понятие ООП предполагает возникновение отказов нескольких объектов. Вообще, если отказ один, то с чем же тогда его причина является общей? В стандарте ISO 13849-1 ситуация еще менее логичная: сам термин дан в единственном числе, а в определении использовано множественное число. Такой разницей не соответствует требованиям [9].

Особо стоит выделить определения в ГОСТ EN 1070-2003 и ГОСТ 34332.3-2021. Они весьма похожи друг на друга и, по своей сути, определяют независимый отказ, т.е. понятие почти что противоположное по смыслу ООП!

Попутно стоит обратить внимание на то, что в некоторых из указанных в табл. 2 стандартов есть серьезные ошибки и в других терминах, относящихся к надежности. Они есть, в частности, в ГОСТ Р 27.102-2021, ГОСТ EN 1070-2003, ГОСТ Р 57329-2016/EN 13306:2010, ГОСТ Р МЭК 60880-2010, ГОСТ Р МЭК 61508-4-2012, ГОСТ 34332.3-2021. Однако их рассмотрение выходит за рамки темы данной статьи. Разбор некоторых подобных ошибок, объяснения причин их возникновения и предложения по улучшению общей ситуации со стандартизацией в области надежности были приведены в [10]. К сожалению, за время, прошедшее после публикации этой статьи, ситуация нисколько не улучшилась.

Отказы по общей причине и отказы общего вида

В терминологических стандартах [3, 4] с термином ООП соседствует другой термин – отказы общего вида (ООВ). К сожалению, их подчас путают или не делают между ними различия (см., например, [11]). Возможно, что этому способствуют краткие примечания, приведенные в указанных стандартах к этим терминам (они будут рассмотрены ниже). Поэтому важно разобраться в этих понятиях и соотношении между ними.

ООВ определяются как отказы различных объектов, характеризующиеся одним и тем же видом отказа [3, 4]. Под видом отказа понимается единица классифи-

кации отказов на основе установленных критериев: особенностей, причины, последствий отказа; функции, способность выполнения которой утрачена в результате отказа; или изменения состояния объекта [4]. Например, в электрических схемах часто выделяют отказы двух видов: обрыв – нарушение контакта там, где он должен быть, и короткое замыкание – возникновение контакта там, где его не должно быть. Если в нескольких элементах устройства произошли обрывы, то их можно считать ООВ. Не обязательно, что все они имеют какую-то общую причину. Об этом говорит примечание 1 к термину ООВ. В этой ситуации ООВ не будут ООП. С другой стороны, возможен случай, когда ООВ имеют общую причину, при этом ООВ будут и ООП. О такой возможности сказано в примечании 2 к термину ООВ. Например, общей причиной обрывов в разных элементах устройства может быть вибрация, которой это устройство подверглось.

В этом примере общая причина привела к ООВ. О такой возможности говорит примечание к термину ООП. Однако это вовсе не обязательно, и общая причина может привести к отказам различного вида в разных элементах системы. Например, влага, проникшая в некоторое устройство, может в одном из его элементов вызвать короткое замыкание, а в другом – нарушение контакта из-за возникшей при этом коррозии. Тогда это будут ООП, но не ООВ.

Учет отказов по общей причине в расчетах надежности

Игнорирование ООП может приводить к серьезным ошибкам в расчете надежности систем. Простой и наглядный пример, подтверждающий это, приведен в [5]. В нем рассмотрена система из двух параллельных элементов. При отсутствии ООП схема для расчета ее надежности имеет вид, изображенный на рис. 1а. Пусть вероятность безотказной работы каждого из элементов равна $P_i = 0,999$ ($i = 1, 2$). Тогда вероятность безотказной работы системы без учета ООП определяется как

$$P_{c1} = 1 - (1 - P_1) \cdot (1 - P_2) = 1 - (1 - 0,999)^2 = 0,999999.$$

Для учета ООП в схему вводится условный элемент, моделирующий ООП и соединяемый последовательно с парой параллельных основных элементов (рис. 1б). Пусть вероятность ООП $Q = 10^{-3}$. Тогда для вероятности безотказной работы системы получим:

$$P_{c2} = [1 - (1 - P_1) \cdot (1 - P_2)] \cdot (1 - Q) = 0,999999 \cdot 0,999 = 0,998999.$$

Сравнивая значения $1 - P_{c2}$ и $1 - P_{c1}$, приходим к выводу, что из-за ООП реальная вероятность отказа системы возросла на три порядка!

Однако столь грубую ошибку, т.е. полное игнорирование ООП, может сделать разве что совсем уж малокомпетентный специалист. Не столь грубой, но также весьма серьезной и более распространенной ошибкой является попытка учета ООП для каждого элемента отдельно в предположении, что отказы элементов независимы.

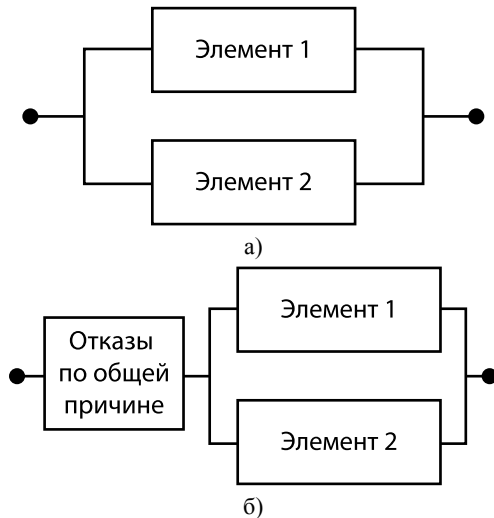


Рис. 1. Схема расчета надежности системы из двух параллельных элементов: а) – без учета ООП, б) – с учетом ООП

Это означает, что в качестве вероятностей безотказной работы элементов берутся значения $P'_i = P_i \cdot (1 - Q) = 0,999 \cdot 0,999 = 0,998001$. Тогда вероятность безотказной работы системы получится равной

$$P_{c3} = 1 - (1 - P'_1) \cdot (1 - P'_2) = 1 - (1 - 0,998001)^2 = 0,999996.$$

Сравнивая $1 - P_{c3}$ и $1 - P_{c2}$, получим, что при такой ошибке вероятность отказа системы оказывается меньше реальной в 250 раз, что также очень много (хотя и меньше, чем 10^3).

Для наглядности отказы, учитываемые в каждом из приведенных выше вариантов расчета, показаны на рис. 2.

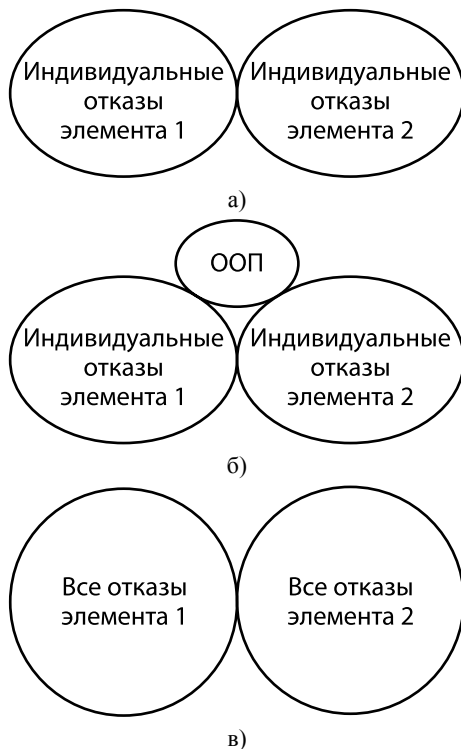


Рис. 2. Отказы элементов, учитываемые в разных вариантах расчета надежности системы:
а) – при расчете P_{c1} , б) – при расчете P_{c2} , в) – при расчете P_{c3}

Приведенный пример убедительно показывает, что ООП действительно снижают эффективность резервирования, как об этом сказано в примечании к термину ООП в стандарте [3], причем весьма существенно.

Перейдем теперь к рассмотрению более общей ситуации. При анализе надежности систем часто используются бинарные индикаторы состояний элементов x_i : $x_i = 1$, если i -й элемент работоспособен, и $x_i = 0$, если i -й элемент неработоспособен. При наличии ООП они будут связанными (ассоциированными) случайными величинами [12]. В [12] математически доказано, что если при расчете вероятности безотказной работы последовательной (параллельной) системы состояния элементов предполагаются независимыми, тогда как на самом деле они статистически связаны, то полученная вероятность окажется заниженной (завышенной) по сравнению с истинным значением. Этот факт отражен также в учебном пособии [13], а для последовательных систем был указан в популярных справочниках [14, 15].

Порой этому обстоятельству дают такую интерпретацию: учет ООП повышает надежность последовательной системы [16, 17]. Такое высказывание представляется неудачным, поскольку никакие отказы и их учет никак не могут повысить надежность. Правильная формулировка может быть такой: неучет ООП занижает представление о надежности последовательной системы.

Чтобы это явление стало более понятным, приведем словесное объяснение его причин. Факт работоспособности некоторого элемента системы повышает вероятность отсутствия ООП, в силу чего повышаются и вероятности работоспособности всех остальных элементов, а значит и системы в целом. С другой стороны, факт отказа какого-то элемента повышает вероятность наличия ООП, в силу чего повышаются вероятности отказов остальных элементов, однако поскольку для отказа последовательной системы достаточно отказа только одного элемента, то отказы других элементов не ухудшат ситуацию. Поэтому вероятность работоспособности системы оказывается выше, чем она была бы при независимости элементов.

Для количественного учета ООП имеются различные математические модели: базового параметра, альфа-фактора, бета-фактора, множества греческих букв, биномиальная (шоковая). Они описаны и исследованы во многих публикациях, краткое описание их сути приведено в [2]. Самой простой и широко используемой из них является модель бета-фактора. Ее исследование было проведено в [16]. К сожалению, в этой статье получены результаты, с которыми нельзя согласиться. Дело в том, что некоторые сделанные там выводы противоречат указанным выше свойствам последовательных и параллельных систем с зависимыми элементами [12–15]. Более того, при некоторых значениях параметров в [16] вообще получаются значения вероятностей большие единицы! Причиной этого является ошибка, от которой предостерегали авторы [17]. Однако там суть дела описана довольно кратко, рассмотрим ее более подробно.

В основе модели бета-фактора лежат предположения, что отказ некоторого элемента (для упрощения записи обозначений его номер не указывается) может произойти из-за индивидуальной причины (событие I) или из-за общей причины (событие C), действующей на все элементы, причем полная вероятность отказа элемента q равна сумме вероятностей его отказов по индивидуальной и общей причине (как будет видно из дальнейших рассуждений, последнее предположение не всегда допустимо). Используемый в этой модели и давший ей название параметр β определяется как отношение вероятности отказа элемента по общим причинам к полной вероятности его отказа (по всем причинам): $\beta = P(C)/q$, откуда

$$P(C) = \beta q. \quad (1)$$

Из теории вероятностей хорошо известна формула для вероятности объединения (суммы, дизъюнкции – логического «или») двух событий, в соответствии с которой

$$q = P(I \cup C) = P(I) + P(C) - P(IC). \quad (2)$$

Отсюда видно, что вероятность объединения двух событий равна сумме вероятностей этих событий только в случае, когда эти события несовместны, т.е. $P(IC) = 0$. Именно такое предположение об отказах по индивидуальной и общей причине сделано в [16]. Однако несовместные события неизбежно будут зависимыми. Зависимость между отказами по индивидуальной и общей причине вряд ли имеет место на практике. Гораздо естественнее считать, что индивидуальные и общие причины отказов действуют независимо друг от друга. Тогда $P(IC) = P(I)P(C) > 0$, и (2) преобразуется к виду

$$q = P(I) + P(C) - P(I)P(C). \quad (3)$$

При малых значениях вероятностей $P(I)$ и $P(C)$ их произведение будет величиной более высокого порядка малости, чем сами эти вероятности, поэтому в этом случае последним членом в (3) можно пренебречь, т.е. вместо (3) положить

$$q \approx P(I) + P(C). \quad (4)$$

Именно это приближенное равенство, справедливое лишь при малых значениях вероятностей отказов, и лежит в основе модели бета-фактора [17]. При этом с учетом (1) и (4) можно считать, что

$$P(I) = (1 - \beta)q. \quad (5)$$

Однако в [16] модель бета-фактора используется и в тех ситуациях, когда лежащие в ее основе допущения не выполняются, т.е. при относительно больших значениях вероятности отказа. Именно эта ошибка видимо и послужила основной причиной того, что некоторые результаты и выводы этой статьи оказались неверными.

Отметим, что в [17] описана модификация модели, которая позволяет преодолеть указанное ограничение. При этом $P(C)$ по-прежнему определяется равенством (1), а вместо (5) используется равенство $P(I) = (1 - \beta)q/(1 - \beta q)$. Оно получается как решение уравнения (3), в которое подставлено $P(C)$, определяемое равенством (1).

Кроме того, существует разновидность модели бета-фактора, в которой рассматриваются не вероятности, а интенсивности отказов [2]. При этом общие и инди-

видуальные причины отказов также предполагаются независимыми, а полная интенсивность отказов представляется в виде суммы

$$\lambda = \lambda_C + \lambda_I, \quad (6)$$

где $\lambda_C = \beta\lambda$ – интенсивность ООП, $\lambda_I = (1 - \beta)\lambda$ – интенсивность отказов по индивидуальным причинам. Это означает, что параметр β определяется как отношение интенсивности ООП к полной интенсивности отказов. При этом равенство (6) является точным, а не приближенным, как (4), поэтому предположение о малости вероятностей отказов здесь уже не требуется. Однако необходимо, чтобы интенсивности отказов были постоянными, это эквивалентно тому, что наработки до отказов имеют экспоненциальные распределения.

Заключение

ООП снижают эффект от резервирования и поэтому обязательно должны учитываться при проектировании систем, к которым предъявляются высокие требования по надежности. Поэтому важно правильно понимать и использовать это понятие, в частности не путать с отказами общего вида. К сожалению, определения отказов по общей причине весьма многочисленны и различаются в разных стандартах. Целесообразно использовать единое определение, беря его из базового терминологического стандарта по надежности с соответствующей ссылкой, как это установлено правилами стандартизации. При этом и в самом термине, и в его определении слово «отказы» должно быть во множественном числе. Особенно неудачны определения в ГОСТ ЕН 1070–2003 и ГОСТ 34332.3–2021, поскольку они совершенно не соответствуют содержанию определяемого понятия. Отказы, в том числе по общей причине, не могут повысить надежность. Однако неучет таких отказов в некоторых случаях может снизить оценку надежности. Самая простая и часто используемая математическая модель для учета отказов по общей причине при расчете надежности – модель бета-фактора для вероятностей отказов – может использоваться только при малых значениях этих вероятностей. В противном случае она может приводить к результатам, которые будут диаметрально противоположны реальной картине.

Библиографический список

1. Карцев В.П., Хазановский П.М. Стихиям не подвластен: 2-е изд., доп. М.: Знание, 1980. 192 с.
2. Jones H.W. Common cause failures and ultra reliability // 42nd Intern. Conf. on Environmental Systems, 2012, San Diego [Электронный ресурс]. URL: https://www.researchgate.net/publication/268473930_Common_Cause_Failures_and_Ultra_Reliability.
3. IEC 60050-192:2015. International Electrotechnical Vocabulary – Part 192: Dependability.
4. ГОСТ Р 27.102–2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения.
5. Аронов И.З. Анализ зависимых отказов – важный способ обеспечения безопасности сложных систем // Методы менеджмента качества. 2004. № 10. С. 49–53.

6. Самойлов О.Б., Усынин Г.Б., Бахметьев А.М. Безопасность ядерных энергетических установок: Учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 280 с.

7. Каналы передачи данных / Под ред. Шварцмана В.О. М.: Связь, 1970. 304 с.

8. Шварцман В.О., Михалев Д.Г. Расчет надежности характеристик трактов передачи данных. М.: Связь, 1975. 152 с.

9. ГОСТ Р ИСО 10241-1-2013. Терминологические статьи в стандартах. Часть 1. Общие требования и примеры представления.

10. Нетес В.А. Как вернуть доверие? О системе стандартов «Надежность в технике» // Стандарты и качество. 2019. № 2. С. 19–24.

11. Морозов В.Б., Токмачев Г.В. Подход к моделированию отказов по общей причине в ВАБ проектов новых АЭС с ВВЭР-1000 // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2008, № 4, с.31–41.

12. Барлоу Р., Прошан Ф. Статистическая теория надежности и испытания на безотказность / Пер. с англ. Ушакова И.А. М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит, 1984. 328 с.

13. Ушаков И.А. Курс теории надежности систем: Учеб. пособие для вузов. М.: Дрофа, 2008. 239 с.

14. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. М.: Сов. радио, 1975. 472 с.

15. Надежность технических систем: Справочник / Под ред. Ушакова И.А. М.: Радио и связь, 1985. 608 с.

16. Антонов А.В., Чепурко В.А., Черняев А.Н. Исследование модели учета отказов по общей причине бета-фактора // Надежность. 2019. № 2. С. 9–17.

17. Ершов Г.А., Ермакович Ю.Л., Парфентьев М.А. Моделирование отказов по общей причине в рамках ВАБ АЭС на основе новых информационных технологий и подходов // Сб. тр. 5-й Междунар. научно-техн. конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», 2007, Подольск [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2007/disc/documents/fl129.pdf>.

References

1. Kartsev V.P., Khazanovsky P.M. [Beyond the elements: second edition]. Moscow: Znanie; 1980. (in Russ.)

2. Jones H.W. Common cause failures and ultra reliability. 42nd Intern. Conf. on Environmental Systems; San Diego; 2012. Available at: https://www.researchgate.net/publication/268473930_Common_Cause_Failures_and_Ultra_Reliability.

3. IEC 60050-192:2015. International Electrotechnical Vocabulary – Part 192: Dependability.

4. GOST R 27.102– 2021. Dependability in technics. Dependability of item. Terms and definitions. (in Russ.)

5. Aronov I.Z. [Analysis of secondary failures is an important way of ensuring the safety of complex systems]. *Metody menedzhmenta kachestva* 2004;10:49-53. (in Russ.)

6. Samoylov O.B., Usynin G.P., Bakhmetiev A.M. [Safety of nuclear power plants: a course book]. Moscow: Energoatomizdat; 1989. (in Russ.)

7. Shvartsman V.O., editor. [Data communication channels]. Moscow: Sviaz; 1970. (in Russ.)

8. Shvartsman V.O., Mikhaliyov D.G. [Calculating the dependability characteristics of data communication paths]. Moscow: Sviaz; 1975. (in Russ.)

9. GOST R ISO 10241-1-2013. Terminological entries in standards. Part 1. General requirements and examples of presentation.

10. Netes V.A. [How to regain trust? About the system of standards “Dependability in engineering”]. *Standarty i kachestvo* 2019;2:19-24. (in Russ.)

11. Morozov V.B., Tokmachiov G.V. [An approach to simulating common cause failures in the PSA of new NPP designs with VVER-1000]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika* 2008;4:31-41. (in Russ.)

12. Barlow R., Proschan F. Statistical Theory of Reliability and Life Testing: Probability Models. Moscow: Nauka, Chief Editorial Board for Literature on Physics and Mathematics; 1984. (in Russ.)

13. Ushakov I.A. [Course of systems dependability theory]: a study guide for higher education institutions. Moscow: Drofa; 2008. (in Russ.)

14. Kozlov B.A., Ushakov I.A. [Handbook for dependability calculation of electronic and automation equipment]. Moscow: Sov. radio; 1975. (in Russ.)

15. Ushakov I.A., editor. [Dependability of technical systems: a handbook]. Moscow: Radio i sviaz; 1985. (in Russ.)

16. Antonov A.V., Chepurko V.A., Cherniaev A.N. Research of the beta-factor model of accounting for common cause failures. *Dependability* 2019;2:9-17.

17. Yershov G.A., Yermakovich Yu.L., Parfentiev M.A. [Simulating common cause failures as part of PSA of NPP using new information technology and techniques]. In: Proceedings of the 5-th International Science and Engineering Conference Ensuring the Safety of NPP with PWR; Podolsk; 2007. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2007/disc/documents/fl129.pdf>. (in Russ.)

Сведения об авторе

Нетес Виктор Александрович – доктор технических наук, профессор Московского технического университета связи и информатики, Москва, Российская Федерация, e-mail: v.a.netes@mtuci.ru.

About the author

Viktor A. Netes, Doctor of Engineering, Professor, Moscow Technical University of Communication and Informatics, Moscow, Russian Federation, e-mail: v.a.netes@mtuci.ru.

Вклад автора в статью

Нетес В.А. провел анализ международных и отечественных стандартов в части определений отказов по общей причине и выявлены имеющиеся в них недостатки; проведен анализ публикаций, посвященных учету отказов по общей причине в расчетах надежности, указаны имеющиеся в них типичные ошибки и неточности, объяснены их причины.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Метод проектирования и конструирования механизмов космического назначения с заданной надежностью

Method for designing and developing space mechanisms with specified dependability

Похабов Ю.П.
Pokhabov Yu.P.

АО «НПО ПМ МКБ», ул. Ленина, д. 55а, Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация, 662972
АО NPO PM MKB, 55a Lenina str., 662972, Zheleznogorsk, Krasnoyarsk Krai, Russian Federation
*pokhabov_yury@mail.ru



Похабов Ю.П.

Резюме. Цель. Исходя из сложившейся концепции космических запусков, практически каждый из космических аппаратов на околоземной орбите должен отделиться от ракеты-носителя и развернуть свои сложенные конструкции в рабочее положение (панели солнечных батарей, антенны, рефлекторы, штанги и проч.) и только после этого он получает возможность полноценно функционировать по своему целевому назначению. Требования к безотказности механизмов одноразового срабатывания настолько высоки, что любая не выявленная потенциальная угроза возникновения критичных отказов при проектировании, конструировании, изготовлении и эксплуатации, может привести к потере смысла создания космического аппарата в целом, на что указывают фатальные результаты запусков Sinosat-2, Экспресс-АМ4, Канопус-СТ, Zuma, Chinasat-18 и мн. др. искусственных спутников и космических объектов. Проектирование механизмов космического назначения с заданной надежностью осложняется тем, что практически все они относятся к типу уникальных высокоответственных систем, которые должны быть максимально безотказными, являются единственными или редкими по своей конструкции, изготовлены максимум в мелкосерийных экземплярах и работают в уникальных условиях внешней среды. Статистических данных по надежности компонентов и элементов механизмов при работе в условиях факторов космического пространства в лучшем случае недостаточно, чтобы получить достоверные результаты расчета надежности с использованием статистических методов современной теории надежности, а в худшем их просто не существует. В условиях постоянного усложнения космической техники и повышения цены любого из орбитальных отказов существует объективная необходимость разработки метода проектирования механизмов космического назначения с учетом оценки выполнения заданной надежности на основе инженерных решений (без привлечения статистических подходов к теории надежности) и процедур раннего предупреждения отказов. **Методы.** В статье представлен метод проектирования и конструирования механизмов космического назначения на основе использования методики конструкторско-технологического анализа надежности. **Результаты.** Предложенный в статье метод позволяет изменить инструментарий проведения аналитической верификации, перейдя при создании изделий от проектных и экспертных методов (например, концепции Stage-Gate или процедур FMEA-анализов) к сугубо инженерным, основанным на инженерных дисциплинах и конструкторско-технологических способах обеспечения качества и надежности. Использование конструкторско-технологического анализа надежности при проектировании и конструировании создает условия, при которых обеспечение надежности становится естественной и неотъемлемой частью работы конструкторов, позволяющей принимать инженерные решения сообразно заданным требованиям надежности (а не в отрыве от них).

Abstract. Aim. According to the established concept of space launch, practically each of the spacecraft in a near-Earth orbit needs to separate from the launch vehicle and deploy its folded structures (solar panels, antennas, reflectors, rods, etc.) in the operational position and only then is able to become fully functional for its intended purpose. The reliability requirements for single-operation mechanisms are so high, that any unidentified potential threat of critical failure in the course of design, development, manufacture and operation may make the creation of such spacecraft pointless, which is confirmed by the fatal results of the missions of the Sinosat-2, Ekspress-AM4, Kanopus-ST, Zuma, Chinasat-18 and many other satellites and space objects. The design of space mechanisms with a specified dependability is complicated by the fact that practically all of them are unique, highly critical systems that are supposed to be as reliable as possible, are unique or rare in terms of their design, are manufactured at most in small series and operate in unique environments. Statistical data on the dependability of components and elements of mechanisms that operate in the open space environment is at best insufficient for obtaining reliable dependability calculation results using the statistical methods

of the modern dependability theory, while at worst they do not exist at all. In the context of constantly growing complexity of space technology and increasing costs of any in-orbit failure there is an objective necessity for developing a method for designing space mechanisms based on the evaluation of the specified dependability using the engineering solutions (without involving statistical methods of dependability) and early failure prevention procedures. **Methods.** The paper presents a method for designing and developing space mechanisms based on the design engineering analysis of dependability. **Results.** The method proposed in the paper allows modifying the analytical verification toolkit, thus migrating from design and expert methods (e.g., Stage-Gate or FMEA) of product design to purely engineering ones that are based on engineering disciplines and design engineering methods of ensuring quality and dependability. The use of design engineering analysis of dependability as part of the design and development enables dependability assurance as a natural and integral part of a designer's work that enables engineering decision-making in accordance with the specified dependability requirements (rather than in an isolated manner).

Ключевые слова: космический аппарат, метод проектирования, проектирование с учетом надежности, подвижные механические узлы, конструкторско-технологический анализ надежности.

Keywords: spacecraft, design method, dependability-specific design, moving mechanical assemblies, design engineering analysis of dependability.

Для цитирования: Похабов Ю.П. Метод проектирования и конструирования механизмов космического назначения с заданной надежностью // Надежность. 2023. №2. С. 26-38. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-2-26-38>

For citation: Pokhabov Yu.P. Method for designing and developing space mechanisms with specified dependability. Dependability 2023;2:26-38. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-2-26-38>

Поступила: 31.03.2023 / **После доработки:** 26.04.2023 / **К печати:** 15.06.2023

Received on: 31.03.2023/ **Revised on:** 26.04.2023 / **For printing:** 15.06.2023

Введение. Космические аппараты предельно чувствительны к орбитальным отказам механизмов раскрывающихся конструкций (солнечных батарей, антенн, рефлекторов, штанг и проч.), поскольку любой их отказ способен привести к частичной или полной потере работоспособности аппарата еще до начала функционирования по целевому назначению [1–3]. Соответственно, обеспечение максимальной надежности является одной из основных задач проектирования механизмов раскрытия космического назначения, что служит одной из причин того, что Mechanisms Education Association с 1966 г. проводит симпозиумы по аэрокосмическим механизмам [4], а АО «ИСС» с 2004 г. – работу секции крупногабаритных трансформируемых конструкций в рамках Решетневских чтений [5].

Сами по себе вопросы надежности технических систем освещены в многочисленных публикациях (научно-технических статьях, монографиях, учебных пособиях и нормативных документах), основной перечень и анализ которых приведен в работах [6–14]. Что касается методов проектирования и конструирования изделий с высокой заданной надежностью, то информация здесь скудна и чаще всего сводится к расплывчатым рекомендациям. Например, считается, что спроектировать изделие с заданной надежностью можно, взяв за основу объекты-аналоги или собрав их из компонентов и элементов с известной надежностью, применяя методы резервирования критичных элементов [15, 16].

За рубежом широко используют рекомендации и подходы к проектированию изделий с учетом надежности (Design for Reliability, DFR), которые сводятся к тому, что «проектируемое изделие, обладающее наивысшим запасом прочности и одновременно удовлетворяющее всем ограничениям (по рабочей температуре, коррозионной устойчивости и усталостному ресурсу материала, давлению, ползучести и т. п.), будет характеризоваться наивысшей надежностью» [17].

Проектирование механизмов космического назначения с заданной надежностью осложняется тем, что практически все они относятся к типу уникальных высокоответственных систем, которые должны быть максимально безотказными, являются единственными или редкими по своей конструкции, изготовлены максимум в мелкосерийных экземплярах и работают в уникальных условиях внешней среды. Статистических данных по надежности компонентов и элементов механизмов при работе в условиях факторов космического пространства в лучшем случае недостаточно, чтобы получить достоверные результаты расчета надежности с использованием статистических методов современной теории надежности, а в худшем их просто не существует. По этой причине при создании сложных (в первую очередь крупногабаритных) систем космического назначения, сочетающих в себе силовые узлы, механизмы, электро-механические устройства, пиротехнические изделия, электронные сборки, программно-аппаратные средства и

проч. компоненты и элементы, используют инженерные методы аналитической и экспериментальной верификации, а также конструкторско-технологические способы обеспечения качества и надежности, не увязывая все это с вычислением показателей надежности (которые объективно существуют, но при проектировании никто не знает их реальных значений, ограничиваясь субъективными оценками в категориях «надежно-ненадежно» и результатами наземной экспериментальной отработки) [18–21]. Анализ орбитальных отказов показывает, что при существующих расчетно-экспериментальных методах инженерного обеспечения уровень безотказности механизмов космических аппаратов может достигать не более 0,99 (с учетом округления до меньшего числа девяток для повышения достоверности), хотя согласно ОСТ 92-4339–80 вероятность безотказной работы не должна быть ниже 0,999 с доверительной вероятностью 0,9 [22, 23].

В условиях постоянного усложнения космической техники и повышения цены любого из орбитальных отказов существует объективная необходимость разработки метода проектирования механизмов космического назначения с учетом оценки выполнения заданной надежности на основе инженерных решений (без привлечения статистических подходов к теории надежности) и процедур раннего предупреждения отказов.

Краткий обзор методов проектирования космических механизмов. За рубежом основные методы проектирования космических механизмов (в международной терминологии – это подвижные механические узлы, *Moving mechanical assemblies*, MMA) подробно изложены, например в справочниках [24–26] и аэрокосмических стандартах MIL-A-83577B, NASA-STD-5017A, AIAA S-114-2005, ECSS-E-ST-33-01C и др. Обзор типовых зарубежных подходов к проектированию и анализу космических механизмов приведен в статье [27], где заостряется внимание на различных аспектах эффективности механизмов: диапазонах движения, запасах крутящих моментов (сил), скоростях раскрытия, сроках службы, точности позиционирования и т. п., а также обобщены цели проектирования механизмов, такие как выявление и устранение потенциальных отказов, повышение надежности механизмов в нестандартных условиях, обеспечение достаточного запаса по силе или крутящему моменту и т. д.

Важно отметить, что в зарубежной практике разработки подвижных механических узлов принято разделять проектные подходы к достижению требуемой надежности в виде выполнения предписанных правил проектирования с методами оценки показателей надежности на основе анализа статистики отказов [25, главы 16, 22]. Причем за рубежом надежность в большей степени рассматривается как результат использования установленной и упорядоченной верификационной деятельности, чем стремление к получению достоверной информации о частоте отказов:

– следует отметить, что значение параметра надежности является условным показателем вероятности от-

казов. Он используется скорее как средство для развития последовательных проектных правил, чем для описания частоты отказов конструкций, – одно из разъяснений, содержащихся в стандарте европейской системы проектирования Eurocode EN 1990:2002;

– все методы оценки надежности требуют экспертных оценок специалистов. Когда мы подходим к этому, значения вероятностей во многом напоминают бирку, которую инженер навешивает на какую-то конструкцию, чтобы показать, что он думает про ее надежность, – высказывание Charles Harlan – руководителя по безопасности и надежности космической программы «Space Shuttle» [28];

– более важно идентифицировать и, по возможности, смягчить последствия видов отказов мерами проектирования, чем знать вероятность их проявления, – пояснение к определению видов отказов в МЭК 60812:2006 (ГОСТ Р 51901.12–2007).

Оторванность результатов применения верификационной деятельности от расчетов показателей надежности статистическими методами для единичных невосстанавливаемых изделий закреплена в МЭК 62308:2006 (ГОСТ Р 27.013–2019): «Вероятность безотказной работы является показателем, который не может быть оценен по данным единственного объекта». На практике это означает, что для космических механизмов не существует инженерных подходов к анализу проектных решений, позволяющих оценить выполнение заданных показателей надежности без статистических данных по отказам. В этом случае, как отмечено в МЭК 60300-3-15:2009 (ГОСТ Р 27.015–2019), выбор способа проектирования осуществляется ситуативно в принятой системе менеджмента надежности, например согласно стандартов серии ECSS, исходя из конкретной области применения, условий эксплуатации и дополнительной информации о специальных характеристиках для выполнения задачи системы.

Применение FME[C,D]A-анализов (в отечественной практике АВП[К]О) для выявления и устранения потенциальных отказов космических механизмов имеет недопустимо низкую эффективность из-за предельно высоких требований к безотказности (превышающих трехсигмовый диапазон изменения случайной величины), поскольку основывается на экспертных (не инженерных) оценках [28]. Кроме того, в первую очередь для единичных невосстанавливаемых систем, результаты FME[C,D]A-анализов не позволяют связать расчеты параметров работоспособности (кинематических, электрических, тепловых, гидравлических и др.) с показателями выполнения заданной надежности [22].

В практике проектирования механизмов с учетом заданной надежности на постсоветском пространстве (в России и Украине) можно упомянуть единственный стандарт ОСТ 92-4339–80, где установлены требования к показателям надежности для механизмов, а также наиболее значимые из публикаций, посвященные методам

проектирования и анализа надежности механизмов [29–33]. Существенным отличием отечественных подходов к проектированию изделий от зарубежных является использование многопараметрического подхода для определения показателей надежности [34]. В отечественной практике проектирования космических механизмов их параметризация производится исходя из обеспечения требуемых параметров прочности и функционирования (раскрытия) [29, 30], запасов движущих моментов (сил) [19, 31, 32] и прочности при раскрытии [33]. При этом отмечается необходимость учета конструкторских и технологических факторов на обеспечение надежности механизмов, но подходов к оценке их влияния на надежность сегодня не существует [35], что является основной причиной, не позволяющей достигнуть требуемого уровня безотказности механизмов на уровне более 0,99 [22].

Однако в последнее время с учетом отечественных научно-технических традиций, изложенных в работах В.В. Болотина [36], А.С. Проникова [37] и А.А. Кузнецова [29], разработана концепция параметрического моделирования надежности функционирования конструкций, позволяющая осуществлять проектирование и конструирование механизмов космического назначения с учетом заданной надежности без привлечения математико-статистического аппарата современной теории надежности [22, 34].

Обобщенная параметрическая модель функционирования. По своей сути проектирование и конструирование (разработка) является одним из процессов организации промышленного производства, направленным на обеспечение способности изделия выполнять требуемые функции. Причем согласно ГОСТ 27.002–2015 способность объекта выполнять требуемые функции принято называть работоспособностью [статья 3.2.3], а свойство сохранять во времени способность выполнять требуемые функции – надежностью [статья 3.1.5]. Таким образом, в основе процессов проектирования (разработки), обеспечения работоспособности и надежности изделия лежит необходимость выполнения требуемых функций. Причем в указанном терминологическом стандарте понятие «требуемая функция» не определено.

Если функцию понимать как внешнее проявление свойств изделия в заданной системе отношений режимов и условий эксплуатации, то функционирование можно представить категориями, отражающими последовательное и взаимообусловленное сочетание свойств и состояний изделия при выполнении служебного назначения – задач, для решения которых оно создается:

- функциональности – совокупности свойств изделия, определяемой наличием и набором возможностей выполнять требуемые функции;
- работоспособности – состояния, в котором изделие способно выполнять требуемые функции;
- надежности – свойства изделия сохранять во времени выполнение требуемых функций в заданных режимах и условиях эксплуатации.

Принимая во внимание пояснение к термину «надежность» в ГОСТ 27.002–2015, что критерии выполнения требуемых функций могут быть установлены, например, заданием для каждой функции набора параметров, характеризующих способность ее выполнения, и допустимых пределов изменения значений этих параметров, указанные категории, отражающие сочетания свойств и состояний изделия, могут быть описаны математическими формулами.

Функциональность можно представить, как множество выходных параметров изделия, обуславливающих выполнение требуемых функций, например с учетом прочности, движущих моментов (сил), зазоров в кинематических парах, электропроводности контактных пар и т. п.:

$$X = \{X_i\} \quad \forall i = (\overline{1, n}), \quad (1)$$

где X – множество выходных параметров X_i , определяющих выполнение требуемых функций; n – число элементов множества X .

Нахождение значений каждого из выходных параметров в границах области допустимых значений, способных обеспечить выполнение требуемых функций, определяет работоспособность изделия:

$$D_x = \{X_i | \alpha_i \leq X_i \leq \beta_i\} \quad \forall i = (\overline{1, n}), \quad (2)$$

где D_x – область допустимых значений изменения выходных параметров X_i ; α_i и β_i – нижняя и верхняя границы допустимого диапазона изменения значений выходных параметров.

Соответственно, если работоспособность изделия рассматривать во времени, то она характеризует надежность – свойство сохранять во времени выполнение требуемых функций в заданных режимах и условиях эксплуатации:

$$R = P[X_i(t) \in D_x; 0 \leq t \leq t_k, \quad \forall i = (\overline{1, n})], \quad (3)$$

где R – надежность объекта, как вероятность P нахождения значений выходных параметров $X_i(t)$ в области допустимых значений D_x за время наработки до отказа t_k .

Формулы (1)–(3) описывают последовательную эволюцию категорий, отражающих сочетания свойств и состояний изделия, которые в системе уравнений представляют обобщенную параметрическую модель функционирования, взаимоувязывающую параметры функциональности, работоспособности и надежности изделия. Такая модель может служить свидетельством того, что изделие должным образом продуманно (достигнута его функциональность), а значения его выходных параметров установлены и обеспечены (определена его работоспособность и надежность). При этом члены множества выходных параметров функциональности сами по себе могут служить основой контрольного списка (чек-листа) [38], в соответствии с которым осу-

ществляют производственно-технические операции для обеспечения и проверок выходных параметров на всех стадиях жизненного цикла при проектировании, разработке, расчетах, испытаниях, изготовлении, техническом контроле и эксплуатации.

Не сложно заметить, что формула (3) является частным случаем формулы надежности, вытекающей из общей теории надежности механических систем с конечным числом степеней свободы [36]:

$$P(t) = P[v(\tau) \in \Omega_0; 0 \leq \tau \leq t], \quad (4)$$

где $P[\bullet]$ – вероятность случайного события, описание которого приведено в квадратных скобках; $v(\tau)$ – траектория элемента качества системы; Ω_0 – допустимая область состояний системы; $P(t)$ – вероятность пребывания элемента $v(\tau)$ в допустимой области Ω_0 в течение заданного интервала времени.

Вместо траектории изменения качества элементов (4) в формуле (3) используют выходные параметры функционирования технической системы в допустимой области, которые определяют в результате параметризации системы и установления диапазона ее работоспособности. Причем формулы (3) и (4) выражают частные случаи классического теоретико-множественного подхода к определению показателей надежности [39].

Новый метод расчета надежности. Надежность (3) можно представить вероятностью пересечения независимых событий, заключающихся в выполнении заданных значений выходных параметров во времени (для упрощения знак функциональной зависимости от времени здесь и далее опущен)

$$R = P(X_1 \cap X_2 \cap X_3 \dots \cap X_n),$$

либо

$$R = P(X_1)P(X_2|X_1)P(X_3|X_1 \cap X_2) \dots P(X_n|X_1 \cap X_2 \cap X_3 \dots \cap X_{n-1}). \quad (5)$$

В случае независимости выходных параметров в смысле надежности, вместо формулы (5) можно использовать известную формулу последовательного соединения критичных элементов [40]:

$$R = \prod_{i=1}^n P_i. \quad (6)$$

Для высоконадежных систем (с учетом расчета надежности «в запас») формулы (3), (5) и (6) можно считать равнозначными, причем формула (6) становится универсальной при использовании метода свертывания структуры надежности, основанном на замене нескольких параллельно соединенных подсистем (элементов) структуры одной подсистемой с эквивалентной надежностью, учитывающей параллельность соединения [41].

Формула (6) дает возможность оценивать надежность изделия с помощью метода расчета надежности

по известным показателям надежности компонентов и элементов [15], в результате чего получают частотную вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ не произойдет. Однако, помимо описания вероятности как частотной характеристики событий, на основании ГОСТ Р 50779.10–2000 формула (6) может также отражать вероятность того, что некоторое событие произойдет, если при разработке (проектировании или конструировании) использовать логическую или субъективную вероятность функционирования будущего изделия. Это становится возможным, если изделие изготовлено и эксплуатируется в строгом соответствии с требованиями технической (конструкторской и технологической) документации, и в конечном итоге приводит к тому, что его надежность будет обеспечена при соблюдении условий бездефектного проектирования и бездефектного производства (т. е. без снижения способности изделия проявлять надежность такой, какой ее задумал конструктор) [42–44]. В этом случае допустимо утверждение

$$R = \{P_{i \text{ лог}} \vee P_{i \text{ суб}} | P_{i \text{ час}}\}, \quad (7)$$

где $P_{i \text{ лог}}$, $P_{i \text{ суб}}$, $P_{i \text{ час}}$ – логическая, субъективная и частотная вероятность i -го случайного события, соответственно.

Использование формул (6)–(7) позволяет производить расчет надежности изделий методом расчета надежности по вероятностям выполнения компонентами и элементами требуемых функций [45] с использованием метода структурной схемы надежности. При этом условиями применения формулы (7) на практике являются [22]:

- соответствие требований к изготовлению и эксплуатации изделий установленным выходным параметрам;
- выполнение условий бездефектного производства и требований эксплуатационной документации.

Расчет надежности по формуле (6) с учетом (7) на этапах проектирования изделий может быть проведен методом фиктивных элементов [29], согласно которому реальный элемент рассматривается лишь в одном из предельных состояний и соответственно имеет лишь один вид отказов. Если тот же элемент может иметь и другой вид отказов, то вводят другой фиктивный элемент, находящийся в другом предельном состоянии. Число фиктивных элементов соответствует предельным состояниям, в которых может находиться реальный элемент. При этом надежность i -го фиктивного элемента равна

$$P_i = P(\alpha_i \leq X_i \leq \beta_i). \quad (8)$$

Если фиктивный элемент может быть описан лишь в вероятностном виде, то формула (8) может быть представлена выражением

$$P_i \in [P_i^{\text{доп}}, 1]. \quad (9)$$

Формулы (1)–(9) позволяют изменить подход к обеспечению надежности от одного из физических дефектов в изделии до одной из ошибок в комплексной системе проектирования, конструирования, изготовления и контроля выходных параметров с человеком в центре [46]. В этом случае становится возможным использовать метод проектирования и конструирования, основанный на полной параметризации изделия (1), а также обосновании и контроле значений параметров для выполнения им требуемых функций согласно (2)–(3) с учетом (6)–(7).

Методика конструкторско-технологического анализа надежности (КТАН). Реализация обобщенной параметрической модели функционирования (1)–(3) с учетом метода расчета надежности по вероятностям выполнения компонентами и элементами требуемых функций (6)–(7) на практике осуществляют с помощью методики КТАН, состоящей из последовательного набора методов анализа и оценки надежности, которые используют при проектировании или конструировании изделий для выбора и обоснования инженерных решений [22, 47].

Методика КТАН основана на принципах параметрического моделирования изделий, т. е. представления их в виде набора и установления соотношений параметров и показателей, позволяющих выполнить требуемые функции. Для этого используют дедуктивный подход (по схеме «сверху–вниз»), в результате которого требуемые функции обнаруживают в процессе рассуждений (анализа) о внешнем проявлении объектом или его элементов ожидаемых (предполагаемых) свойств в заданных режимах и условиях применения. Функциональность в виде множества выходных параметров (1), предназначенных для количественного выражения требуемых свойств, определяют при анализе конструкции от общего к частному – от конструкции в целом, к ее функциональным группам, узлам, деталям, элементам конструкции и интерфейсам.

Процедуры методики выявления функциональности конструкции осуществляют последовательно, устанавливая [47]:

- задачи служебного назначения конструкции;
- требуемые функции при выполнении служебного назначения (методом описания требуемых функций);
- отказы как события, препятствующие выполнению требуемых функций (методом определения возможных отказов);
- свойства конструкции, при реализации которых отказы становятся невозможными (методом парирования отказов);
- выходные параметры или показатели, которыми характеризуют искомые свойства (методом определения выходных параметров).

В конечном итоге, выполнение указанных процедур позволяет выявить выходные параметры или показатели, характеризующие критичные элементы, отказы которых способны привести к частичному или полному невыполнению требуемых функций изделия. Описания методов

определения и примеры проведения функциональности конкретных космических механизмов различного назначения приведены в работах [22, 47].

Для определения значений параметров или показателей критичных элементов проводят расчеты работоспособности, которые сводятся к двум задачам определения членов выражения (2):

- проведению расчетов значений соответствующих выходных параметров (показателей) X_i ;
- установлению критериев оценки достоверности расчетов путем установления границ допустимого диапазона изменения значений выходных параметров α_i и β_i , в котором должны находиться выходные параметры.

Решение первой задачи основано на определении значений параметров конструкции, которые способны обеспечить выполнение требуемых функций, причем для их выполнения в чертежах должны быть установлены все необходимые и достаточные требования для изготовления и контроля на производстве. Под расчетом в данном случае понимают не только вычисления значений параметров на основе математических формул (которые называют инженерными расчетами), но и проверку разного рода гипотез, основанных на учете каких-либо объективных обстоятельств, например для определения вероятностных показателей по схеме «событий–проверок» [47, 48]. Параметры (показатели), определяемые в результате таких расчетов, характеризуют сопротивляемость конструкции внешним воздействиям и предназначены для соотнесения с допустимыми значениями.

Решение второй задачи связано с воздействием факторов внешней среды, которые в сочетании с режимами функционирования изделий, способны ограничить значения параметров работоспособности и снизить надежность [22, 47]. При этом границы допустимых диапазонов изменения значений параметров определяют методом анализа худшего случая (аналог ГОСТ Р 58626–2019). Особое внимание уделяют расчетным случаям, в которых по совокупности с внешней средой техническая система по границам интерфейсов получает качественно новые свойства, называемые эмерджентностью, – появление у системы свойств, не присущих ее элементам в отдельности [49]. Например, статическое (квазистатическое) нагружение изделия не приводит к новым свойствам изделия, не вытекающим из свойств отдельных его частей, подчиняющихся законам сопротивления материалов. Однако динамическое нагружение в диапазоне частот внешнего воздействия, совпадающих с низшими значениями собственных частот колебаний изделия, способно привести к возникновению резонансов – резкому увеличению амплитуд стационарных колебаний. Таким образом, система «изделие–внешняя среда» получает новое свойство – эмерджентность, связанное с совпадением собственных частот колебаний с частотами внешнего нагружения, которое исчезает после снятия динамической нагрузки. Данное новое свойство способно привести к невыполнению требу-

емых функций, связанных, например, с разрушением конструкции. Аналогичный эффект появляется также при вибрационном воздействии, когда в резьбовых соединениях возникают вибрационные перемещения – подвижности под действием вибрации номинально неподвижных деталей машин [50]. Это способно привести к самоотвинчиванию резьбовых соединений и последующему разрушению конструкций [22, 47, 50].

Все расчеты работоспособности проводят исходя из выбранных конструктивных параметров (геометрических размеров и характеристик применяемых материалов), режимов используемых технологий изготовления и других ограничений, которые уточняют служебное назначение изделий в состоянии «как они есть» на каждом этапе жизненного цикла. Как правило, выбор методик расчетов параметров работоспособности определяется опытом и предпочтениями расчетчиков. С развитием цифровых технологий, программные пакеты для проведения мультидисциплинарных CAE-и НРС-расчетов (расчеты прочности, оптимизации, теплообмена, динамики, колебаний, вибрации, ударов, электромагнетизма, CFD-расчеты и т. п.) предлагаются разработчикам технических систем как готовый продукт. Использование таких программных пакетов для проведения технических расчетов, с одной стороны, удобно для практического использования, но, с другой стороны, способно привести к ошибкам из-за того, что пользователи, как правило, не вдаются в тонкости составления конечно-элементной модели, полагаясь по умолчанию на алгоритмизированные процедуры программных продуктов [51]. В частности, численные расчеты методом конечных элементов сами по себе не делают результаты расчетов релевантными и достоверными, если они не прошли процедур верификации исходных данных и валидации результатов вычислений [22].

В целом задача расчетов работоспособности заключается в определении значений параметров, которые обуславливают текущее состояние конструкции, позволяющей выполнять требуемые функции. Именно значения этих параметров характеризуют способность изделия сопротивляться внешним воздействиям и нагрузкам. Согласованность конструкции с ее функциональностью определяется тем, что число расчетов работоспособности (2) соответствует числу членов множества (1). Это позволяет избежать случайных ошибок, ведущих к непоправимым результатам, на этапах проектирования и конструирования при выполнении расчетов работоспособности конструкции [22].

Процедуры определения функциональности (1) и работоспособности (2) являются необходимыми и важными условиями проведения конструкторско-технологического анализа, поскольку позволяют параметризовать конструкцию, а также выбрать и обосновать ее выходные параметры исходя из ограничений со стороны действующих режимов и условий эксплуатации изделий. Однако в процессе эксплуатации выходные параметры могут изменять свои значения из-за наследования ан-

тропогенных и технологических воздействий, кинетики накопления повреждений под воздействием различных видов энергий, деградации свойств материалов во времени и т. п. Указанные факторы способны в значительной степени влиять на выполнение условий (8)–(9), снижая вероятность нахождения выходных параметров (показателей) конструкции в допустимом диапазоне. Повышению такой вероятности способствует выбор значений выходных параметров с учетом конструктивных запасов – приемов, позволяющих с приемлемым риском регламентировать любые изменения значений выходных параметров изделия в пределах допустимой области состояний. Это позволяет в процессе эксплуатации сохранять работоспособность изделия в течение заданного времени и с определенным доверием гарантировать нахождение значений рассматриваемых параметров в допустимой области, что в конечном итоге принято называть надежностью (3). Расчет надежности с учетом конструктивных запасов можно рассматривать как метод оценки теоретической надежности по проектным параметрам изделия, результаты которого характеризуют не частотное проявление отказов, а обоснованность принятия инженерных решений для достижения заданной надежности. Однако именно обоснованные инженерные решения позволяют достигнуть заданной надежности.

Использование конструктивных запасов существенно упрощает выбор и обоснование параметров при конструировании для достижения требуемой надежности при отсутствии статистических моделей поведения изделий в заданных режимах и условиях применения. Видов конструктивных запасов может быть множество, однако, их сущность в общем виде можно пояснить с помощью хорошо известных гауссовых кривых (кривых нормального распределения случайных величин), описывающих нагрузку N и сопротивление (прочность) T [52]. Обеспечение надежности в модели отказов по схеме «нагрузка–сопротивление» с использованием конструктивных запасов может достигаться тремя способами – максимально возможным разнесением математических ожиданий параметров сопротивления m_T и нагрузки m_N , снижением коэффициентов вариации нагрузки $v_N = \sigma_N / m_N$ или сопротивления $v_T = \sigma_T / m_T$, здесь σ_N и σ_T – среднеквадратические значения нагрузки и сопротивления.

Наиболее известными примерами конструктивных запасов в инженерии являются коэффициенты безопасности и запасы прочности, позволяющие варьировать параметрами нагрузки и сопротивления (математическими ожиданиями и среднеквадратическими отклонениями) исходя из правил статистической теории надежности. Значения коэффициентов безопасности и запасов прочности обычно нормируют для различных типов изделий и условий нагружения, например, по ГОСТ Р 56514–2015. Если нормированных значений коэффициентов безопасности и запасов прочности при расчетах на прочность не существует, например, для конструкций из композиционных материалов, то для их установления можно использовать подходы, учиты-

вающие коэффициенты вариации внешних нагрузок и сопротивления материалов, которые изложены в работах [53, 54].

Кроме указанных примеров, на практике используют конструктивные запасы в виде резервирования, запасов движущих моментов (сил), параметрической избыточности, силовых и температурных развязок, процедур получения гарантированных результатов, например с применением минимаксных критериев или с использованием факторов инженерной психологии, которые приведены в работах [22, 47]. Все конструктивные запасы назначают исходя из правил статистической теории надежности (например, коэффициенты безопасности и запасы прочности), подтвержденной практики применения (например, запасы движущих моментов (сил) [22, 25, 31, 32]), конструктивных приемов, направленных на снятие ограничений по изменению выходных параметров (например, путем использования силовых и температурных развязок [55–57]) или иных организационно-технических действий, снижающих либо исключающих вероятность возникновения отказов [58]. В частности, при использовании статуса «особо ответственной операции» надежность обеспечивается путем снижения коэффициента вариации нагрузки за счет уменьшения вероятности совершения ошибок при сборочных операциях [22].

Проектирование и конструирование механизмов космического назначения с заданной надежностью. Обобщенная параметрическая модель функционирования (1)–(3) и методика проведения КТАН дает возможность производить оценку надежности исходя из выходных параметров, которые приняты и обоснованы при проектировании и конструировании на основе инженерных дисциплин и конструкторско-технологических способах обеспечения качества и надежности. Это повышает эффективность проведения аналитической верификации, недоступную при использовании известных методов оценки показателей безотказности, например по государственному стандарту ГОСТ Р 27.013–2019, или по корпоративным стандартам, например АО «ИСС» – МУ 154-24–2007.

Оценка надежности при принятии и обосновании инженерных решений по формулам (1)–(9) позволяет на системной основе исключать различного рода причины возможных отказов, связанных с несовершенством конструкторской документации [47]. При этом конструктор, понимая и осознавая последствия своих решений, способен использовать широкий спектр конструктивных запасов, позволяющих достигнуть заданной надежности любым из известных ему (или удобных для него) способов:

- на основе имеющихся статистических данных;
- с учетом способов достижения избыточности конструкции (структурной, функциональной, нагрузочной и т. п. согласно Р 50-54-82–88);
- применяя конструктивные запасы, основанные на процедурах получения гарантированных результатов

(использование минимаксных критериев, факторов инженерной психологии, режимов проведения особо ответственных операций и т. д.);

- моделируя (эмулируя) спорадические события и воздействия антропогенного, техногенного или природного характера;
- используя другие конструктивные и конструкторские приемы, позволяющие обеспечить сохранение выходных параметров в допустимой области своих значений.

Как неотъемлемая часть процедур проектирования и конструирования механизмов космического назначения, результаты КТАН важны в привязке с анализом соответствия проектных параметров требованиям конструкторской и технологической документации, который основан на проверке релевантности выходных параметров (1), выявленных в результате параметризации функционирования механизмов, с требованиями конструкторской и технологической документации в состоянии «как она есть».

Проверка релевантности выходных параметров требованиям конструкторской документации проводят путем подтверждения того, что значения каждого из параметров при расчетах теоретической надежности выбраны в соответствие с нормативно-технической документацией, а в конструкторской документации предусмотрены достаточные требования для их подтверждения. Например, если используется конструкционный материал или конструктивное соединение с ненормированными характеристиками прочности, то в конструкторской документации должны быть указаны нормы прочности, включающие требования к назначению коэффициентов безопасности, экспериментальной отработке прочности, контролю и подтверждению прочности на этапах экспериментальной отработки, летной и штатной эксплуатации [22, глава 6].

Для каждого выходного параметра, обеспечивающего работоспособность и надежность изделия в конструкторской документации должны быть установлены требования для их достижения, подтверждения и контроля. Анализ проводят путем сличения контрольного списка параметров на основании которых были сделаны расчеты надежности (3) с требованиями, которые установлены в конструкторской документации согласно видам документов по ГОСТ 2.102–2013 (чертежах деталей, сборочных чертежах, спецификациях чертежей, технических условиях, расчетах, программах и методиках и т. п.).

Проверка релевантности параметров требованиям технологической документации проводится путем сверки с требованиями конструкторской документацией. Каждое из требований конструкторской документации должно быть без искажений и пропусков отражено в технологической документации. Особое внимание следует уделять случаям общей отсылки в чертежах к типовым технологическим процессам, когда там предусмотрены требования по детализации выполнения технологических операций, которые должны быть в обязательном

порядке отражены в чертежах. В противном случае технолог может на свое усмотрение трактовать операции типового технологического процесса в технологической документации, полагая, что если конструктор не задает какое-либо из требований, то оно несущественно или неважно, и тем самым может быть невольно нарушен конструкторский замысел, что способно привести к непредумышленному созданию условий для потенциальных отказов.

По результатам анализа конструкторской и технологической документации может быть произведена оценка рисков возникновения отказов из-за неустановленных или недостаточных требований в чертежах, что может привести к недопустимым производственным дефектам при изготовлении или к отсутствию контроля (ненадлежащему контролю) параметров критичных элементов [22, глава 5].

Выводы. Использование при проектировании и конструировании механизмов космического назначения методики конструкторско-технологического анализа надежности (КТАН) позволяет каждое инженерное решение обуславливать критериями выполнения требуемой работоспособности и заданной надежности. Для этого конструктору не требуется статистический аппарат современной теории надежности, достаточно использовать процедуры методики КТАН, знать инженерные дисциплины и конструкторско-технологические способы обеспечения качества и надежности.

Метод проектирования и конструирования механизмов космического назначения на основе КТАН не отменяет и не исключает ни одну из инженерных практик, но развивает и дополняет их, что дает возможность:

- обнаруживать редкие причины возможных отказов;
- определять конструкторские и технологические риски возникновения отказов, которые традиционными методами верификации выявить невозможно;
- уходить от концепции случайности причин отказов и находить их логико-математической связь с конструктивно-технологическими факторами;
- устанавливать связь выходных параметров функционирования с вероятностью отказов;
- сокращать число потенциальных отказов конструкционного характера на ранних стадиях жизненного цикла и т. п.

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

- постановку задач для расчетной верификации (проведение необходимых и достаточных расчетов параметров работоспособности и надежности по заданным критериям для максимального снижения вероятности необоснованных рисков возникновения возможных отказов);

- постановку задач для экспериментальной верификации, включающих опытное определение значений параметров, которые не могут быть получены в результате расчетной верификации из-за отсутствия необходимых данных, и подтверждение требуемых параметров работоспособности при наземной экспериментальной отработке исходя из условия по ограничению объектов, поставляемых на испытания;

- установку необходимых и достаточных требований в конструкторской документации для изготовления и эксплуатации изделий;

- получение контрольного списка (чек-листа) выходных параметров конструкции, по которым проводится проверка качества и надежности изделий;

- планирование мероприятий по предупреждению отказов конструкционного характера на всех стадиях жизненного цикла;

- итерационный подсчет (калькулирование) прогнозируемой надежности в результате проведения требуемых мероприятий по предупреждению отказов конструкционного характера;

- оценку конструкторско-технологических решений на соответствие заданным требованиям к надежности.

Заключение. Метод проектирования и конструирования механизмов космического назначения на основе использования методики КТАН позволяет изменить инструментарий проведения аналитической верификации, перейдя при создании изделий от проектных и экспертных методов (например, концепции Stage-Gate или процедур FMEA-анализов) к сугубо инженерным, основанным на инженерных дисциплинах и конструкторско-технологических способах обеспечения качества и надежности.

Использование конструкторско-технологического анализа надежности при проектировании и конструировании создает условия, при которых обеспечение надежности становится естественной и неотъемлемой частью работы конструкторов, позволяющей принимать инженерные решения сообразно заданным требованиям надежности (а не в отрыве от них).

Библиографический список

1. Fusaro R.L. NASA Space Mechanisms Handbook – Lessons Learned Documented // Research & Technology 1998. NASA/TM – 1999-2088815. P. 138–140.
2. Shapiro W., et al. Space Mechanisms Lessons Learned Study, Volume I – Summary. NASA/TM-107046, 1995.
3. Shapiro W., et al. Space Mechanisms Lessons Learned Study, Volume II – Literature Review. NASA/TM-107047, 1995.
4. Archive [Электронный ресурс] / Aerospace Mechanisms Symposia: сайт. URL: <https://aeromechanisms.com> (дата обращения 22.01.2022).
5. Материалы конференции [Электронный ресурс] / СибГУ им. М.Ф. Решетнева : сайт. URL: <https://reshetnev.sibsau.ru/page/materialy-konferentsii> (дата обращения 22.01.2022).

6. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности радиоэлектроники и автоматики. М.: Сов. радио, 1975. 472 с.
7. Ушаков И.А. Надежность: прошлое, настоящее, будущее: пленарный доклад на открытии конференции «Математические методы в надежности» (MMR–2000), Бордо, Франция, 2000 // Надежность: Вопросы теории и практики (Reliability: Theory & Applications). 2006. № 1. С. 17–27.
8. Шпер В.Л. Реферативный аналитический обзор наиболее значимых публикаций в отечественной и зарубежной периодике по вопросам оценки надежности продукции, в том числе об опыте предприятий // Надежность: вопросы теории и практики (Reliability: Theory & Applications). 2006. № 3. С. 106–119.
9. Шпер В.Л. Реферативный аналитический обзор наиболее значимых публикаций в отечественной и зарубежной периодике по вопросам оценки надежности продукции, в том числе об опыте предприятий (продолжение) // Надежность: вопросы теории и практики (Reliability: Theory & Applications). 2006. № 4. С. 106–119.
10. Шпер В.Л. Проблемы надежности продукции в отечественной и зарубежной периодике // Методы менеджмента качества. 2007. № 12. С. 44–47.
11. Апполонов И.В., Дадашев М.Н., Кухаренко А.А. и др. Анализ основных работ по надежности, выполненных в СССР и основные задачи на перспективу XXI века // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2006. № 2. С. 88–100.
12. Апполонов И.В., Разумовский В.А., Котов А.Н. и др. Основные работы по надежности второй половины XX века в СССР и России и основные задачи по обеспечению надежности и безопасности техники XXI века (обзор) // Оборонный комплекс – научно-техническому прогрессу России. 2008. № 3. С. 3–19.
13. Апполонов И.В., Хариев Н.И. Этапы формирования и развития проблематики надежности в ведущих машиностроительных отраслях СССР и России с 30-х годов XX века по настоящее время // Менеджмент. Вооружение. Качество. 2017. № 2. С. 1–13.
14. Можаяева И.А., Струков А.В. Тенденция в развитии стандартов международной энергетической комиссии в области управления надежностью технических систем // Актуальные проблемы защиты и безопасности. Труды XXIII Всероссийской научно-практической конференции Российской академии ракетных и артиллерийских наук (РАРАН), в 5 т. Москва, 2020. С. 253–260.
15. Приложение (справочное) // ГОСТ 27.002–89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Изд-во стандартов, 1990. 37 с.
16. Нейман Д. Вероятностная логика и синтез надежных организмов из ненадежных компонент // В сб. ст.: Автоматы. М.: ИЛ, 1956. С. 129–185.
17. Клиффорд М. Справочник инженера. Инженерная механика [пер. с англ.]. М.: Изд-во АСВ, 2003. 279 с.
18. Космические вехи: сб. науч. тр., посвященный 50-летию создания ОАО «ИСС» им. академика М.Ф. Решетнева». Красноярск: ИП Суховольская Ю.П., 2009. 704 с.
19. Романов А.В., Тестоедов Н.А. Основы проектирования информационно-управляющих и механических систем космических аппаратов. СПб.: Профессионал, 2015. 240 с.
20. Соустин Б.П., Тестоедов Н.А., Рудометкин А.Г. и др. Виброиспытания космических аппаратов. М.: Наука, 2000. 171 с.
21. Галеев А.Г., Захаров Ю.В., Макаров В.П. и др. Проектирование испытательных стендов для экспериментальной отработки объектов ракетно-космической техники. М.: Изд-во МАИ, 2014. 328 с.
22. Похабов Ю.П. Теория и практика обеспечения надежности механических устройств одноразового срабатывания. Красноярск: СФУ, 2018. 338 с.
23. Горбенко А.В., Засуха С.А., Рубан В.И. и др. Безопасность ракетно-космической техники и надежность компьютерных систем: 2000–2009 гг. // Авиационно-космическая техника и технология. 2011. № 1. С. 9–20.
24. Spacecraft Structures and Mechanisms: From Concept to Launch / Edited by Thomas P. Sarafin. NJ.: Springer, 1995. 868 p.
25. Space Vehicle Mechanisms – Elements of Successful Design / Edited by Peter L. Conley. NJ.: John Wiley & Sons, 1998. 794 p.
26. NASA Space Mechanisms Handbook, Glenn Research Center NASA/TP 206988 / Edited by Robert L. Fusaro. Cleveland, OH, 1999.
27. Fowler R.M., Howell L.L., Magleby S.P. Compliant space mechanisms: a new frontier for compliant mechanisms / Mechanical Sciences. 2011. № 2. P. 205–215.
28. Лернер Э.Дж. Альтернатива «запуску на авось» // Аэрокосмическая техника. 1987. № 9. С. 157–160.
29. Кузнецов А.А. Надежность конструкции баллистических ракет. М.: Машиностроение, 1978. 256 с.
30. Кузнецов А.А., Золотов А.А., Комягин В.А. и др. Надежность механических частей конструкции летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1979. 144 с.
31. Шатров А.К., Назарова Л.П., Машуков А.В. Механические устройства космических аппаратов. Конструктивные решения и динамические характеристики. Красноярск: СибГАУ, 2006. 84 с.
32. Шатров А.К., Назарова Л.П., Машуков А.В. Основы конструирования механических устройств космических аппаратов. Конструктивные решения, динамические характеристики. Красноярск: СибГАУ, 2009. 144 с.
33. Безручко К.В., Гайдуков В.Ф., Губин С.В. и др. Солнечные батареи автоматических космических аппаратов (компоновка на КА, конструкция узлов, проекторочные расчеты). Харьков: ХАИ, 2011. 276 с.
34. Анцупов А.В. (мл), Анцупов А.В., Анцупов В.П. и др. Моделирование процессов формирования отказов металлургических машин. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск, 2021. 211 с.

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

36. Болотин В.В. Теория надежности механических систем с конечным числом степеней свободы / Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1969. № 5. С. 74–81.

37. Проников А.С. Параметрическая надежность машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 560 с.

38. Гаванде А. Чек-лист. Как избежать глупых ошибок, ведущих к фатальным последствиям. М.: ООО «Альпина Паблишер», 2014. 204 с.

39. Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. Основные характеристики надежности и их статистический анализ. М.: Наука, 1965. 524 с.

40. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем. М.: Мир, 1984. 318 с.

41. Белов А.В., Борейшо А.С., Морозов А.В. и др. Проектирование и надежность лазерных комплексов специального назначения. СПб.: БГТУ, 2014. 347 с.

42. Похабов Ю.П. Конструкторско-технологический подход к обеспечению заданной надежности (на примере уникальных высокоответственных систем с малой наработкой) // Надежность. 2022. Т. 22. № 1. С. 20–29.

43. Горохова В.В. Применение Саратовской системы при проведении исследовательских и конструкторских работ. М.: Изд. стандартов, 1969. 105 с.

44. Дубовиков Б.А. Основы научной организации управлением качества (опыт применения и теоретические обоснования системы организации бездефектного труда). М.: Экономика, 1966. 321 с.

45. Похабов Ю.П. Надежность: взгляд конструктора // Надежность. 2020. Т. 20. № 4. С. 13–20.

46. Reason J. Human Error. Cambridge: University Press, 1990. 302 p.

47. Похабов Ю.П. Конструкторско-технологический анализ надежности. Методическое пособие (на примере системы отделения космических аппаратов). Железногорск: АО «НПО ПМ МКБ», 2020. 57 с. / Режим доступа: http://www.gnedenko.net/new_books/Pokhabov2021.pdf (дата обращения 16.02.2022).

48. Тимашев С.А., Похабов Ю.П. Проблемы комплексного анализа и оценки индивидуальной конструкционной надежности космических аппаратов (на примере поворотных конструкций). Екатеринбург: АМБ, 2018. 38 с.

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

50. Блехман И.И. Вибрационная механика. М.: Физматлит, 1994. 400 с.

51. Доронин С.В., Похабов Ю.П. Повышение достоверности оценок прочности конструкций технических объектов // Вестник машиностроения. 2013. № 6. С. 85–88.

52. Похабов Ю.П., Шендалев Д.О., Колобов А.Ю. и др. К вопросу установления коэффициентов безопасности и запасов прочности при заданной вероятности

неразрушения силовых конструкций // Сибирский аэрокосмический журнал. 2021. Т. 22, № 1. С. 166–176.

53. Гладкий В.Ф. Вероятностные методы проектирования конструкции летательных аппаратов. М.: Наука, 1982. 524 с.

54. Бирюков Г.П., Кукушкин Ю.Ф., Торпачев А.В. Основы обеспечения надежности и безопасности стартовых комплексов. М.: Изд-во МАИ, 2002. 264 с.

55. Способ закрепления изделий статически неопределимой системой связей: пат. 2125528 Рос. Федерации. МПК В64G 1/44 / Ю.П. Похабов, В.Н. Наговицин. № 5067373/28; заявл. 29.09.1992; опубл. 27.01.1999. Бюл. № 3.

56. Способ закрепления изделий: пат. 2230945 Рос. Федерации. МПК F16B 1/00 / Ю.П. Похабов, В.В. Гриневич. № 2002113143/11; заявл. 18.05.2002; опубл. 20.06.2004. Бюл. № 17.

57. Болтовое соединение деталей из материалов с разными коэффициентами теплового расширения: пат. 2263827 Рос. Федерации. МПК F16B 5/02 / Ю.П. Похабов, В.Н. Наговицин. № 2003112578/11; заявл. 28.04.2003; опубл. 20.10.2004. Бюл. № 31.

58. Шишмарев В.Ю. Надежность технических систем. М.: Издат. центр «Академия», 2010. 304 с.

References

1. Fusaro R.L. NASA Space Mechanisms Handbook – Lessons Learned Documented. *Research & Technology* 1998. NASA/TM 1999:138–140.

2. Shapiro W. et al. Space Mechanisms Lessons Learned Study, Volume I – Summary. NASA/TM-107046; 1995.

3. Shapiro W. et al. Space Mechanisms Lessons Learned Study, Volume II – Literature Review. NASA/TM-107047; 1995.

4. Aerospace Mechanisms Symposia. (accessed 22.01.2022). Available at: <https://aeromechanisms.com>

5. Conference proceedings. (accessed 22.01.2022). Available at: <https://reshetnev.sibsau.ru/page/materialy-konferentsii>. (in Russ.)

6. Kozlov B.A., Ushakov I.A. [Guide for dependability calculation of electronic and automation devices]. Moscow: Sov. radio; 1975. (in Russ.)

7. Ushakov I.A. [Dependability: past, present, future: keynote speech of the opening of the Mathematical Methods in Reliability (MMR–2000) conference, Bordeaux, France, 2000]. *Reliability: Theory & Applications* 2006;1:17–27. (in Russ.)

8. Shper V.L. [An analytical review of the most significant publications in Russian and foreign periodicals dedicated to the evaluation of dependability of products, including the experience of manufacturers]. *Reliability: Theory & Applications* 2006;3:106–119. (in Russ.)

9. Shper V.L. [An analytical review of the most significant publications in Russian and foreign periodicals dedicated to the evaluation of dependability of products, including the experience of manufacturers (continued)]. *Reliability: Theory & Applications* 2006;4:106–119. (in Russ.)

10. Shper V.L. [Matters of dependability of products in the Russian and foreign periodicals]. *Metody menedzhmenta kachestva* 2007;12:44-47. (in Russ.)
11. Appolonov I.V., Dadashev M.N., Kukharensko A.A. et al. [An analysis of key dependability-related activities performed in the USSR and primary objectives for the XXI century]. *Oboronny kompleks – nauchno-tehnicheskomu progressu Rossii* 2006;2:88-10. (in Russ.)
12. Appolonov I.V., Razumovsky V.A., Kotov A.N. [Key dependability-related activities of the second half of the XX century in the USSR and Russia and primary objectives related to ensuring dependability and safety of technology in the XXI century (a review)]. *Oboronny kompleks – nauchno-tehnicheskomu progressu Rossii* 2008;3:3-19. (in Russ.)
13. Appolonov I.V., Khariev N.I. [Development stages of the matters related to dependability in the leading branches of engineering of the USSR and Russia since the 1930-s to the present day]. *Menedzhment. Vooruzheniye. Kachestvo* 2017;2:1-13. (in Russ.)
14. Mozhaeva I.A., Strukov A.V. [Trends in the development of the standards of the international energy commission in the area of technical system dependability management]. In: [Relevant matters of protection and security. Proceedings of the XXIII All-Russian Science and Practice Conference of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences (RARAN) in 5 volumes]. Moscow; 2020. P. 253-260. (in Russ.)
15. Annex (informative). GOST 27.002-89. Industrial product dependability. General principles. Terms and definitions. Moscow: Izdatelstvo Standartov; 1990. (in Russ.)
16. Neumann J. Probabilistic Logic and the Synthesis of Reliable Organisms from Unreliable Components. In: *Avtomaty*, collected papers. Moscow: IL; 1956. P. 129-185.
17. Clifford M. ASME Engineer's Data Book. Moscow: Izd-vo ASV; 2003.
18. [Milestones in space: collection of research papers dedicated to the 50-th anniversary of ISS-Reshetnev]. Krasnoyarsk: IP Sukhovolskaya Yu.P.; 2009. (in Russ.)
19. Romanov A.V., Testodov N.A. [Introduction to the design of information management and mechanical systems of spacecraft]. Saint Petersburg: Professional; 2015. (in Russ.)
20. Soustin B.P., Testodov N.A., Rudometkin A.G. et al. [Vibration testing of spacecraft]. Moscow: Nauka; 2000. (in Russ.)
21. Galejev A.G., Zakharov Yu.V., Makarov V.P. et al. [Designing test rigs for experimental development of rocket and space equipment]. Moscow: MAI Publishing; 2014. (in Russ.)
22. Pokhabov Yu.P. [Theory and practice of ensuring the dependability of single-use mechanical devices]. Krasnoyarsk: SFU; 2018. (in Russ.)
23. Gorbenko A.V., Zasukha S.O., Ruban V.I. et al. Safety of rocket-space engineering and reliability of computer systems: 2000-2009. *Aerospace technic and technology* 2011;1:9-20. (in Russ.)
24. Sarafin T.S., editor. *Spacecraft Structures and Mechanisms: From Concept to Launch*. NJ: Springer; 1995.
25. Conley P.L., editor. *Space Vehicle Mechanisms – Elements of Successful Design*. NJ: John Wiley & Sons; 1998.
26. Fusaro R.L., editor. *NASA Space Mechanisms Handbook*, Glenn Research Center NASA/TP 206988. Cleveland, OH; 1999.
27. Fowler R.M., Howell L.L., Magleby S.P. Compliant space mechanisms: a new frontier for compliant mechanisms. *Mechanical Sciences* 2011;2:205-215.
28. Lerner E.J. [Alternative to “starting at haphazard”]. *Aerokosmicheskaya tekhnika* 1987;9:157-160.
29. Kuznetsov A.A. [Structural dependability of ballistic missiles]. Moscow: Mashinostroenie; 1978. (in Russ.)
30. Kuznetsov A.A., Zolotov A.A., Komyagin V.A. et al. [Dependability of mechanical parts of aircraft design]. Moscow: Mashinostroenie; 1979. (in Russ.)
31. Shatrov A.K., Nazarova L.P., Mashukov A.V. [Mechanical devices of spacecraft. Design solutions and dynamic characteristics]. Krasnoyarsk: SibGAU; 2006. (in Russ.)
32. Shatrov A.K., Nazarova L.P., Mashukov A.V. [Introduction to the design of mechanical devices of spacecraft. Design solutions, dynamic characteristics]. Krasnoyarsk: SibGAU; 2009. (in Russ.)
33. Bezruchko K.V., Gaydukov V.F., Gubin S.V. et al. [Solar panels of automatic spacecraft (arrangement, unit design, design calculations)]. Kharkov: KhAI; 2011. (in Russ.)
34. Antsupov A.V., jr., Antsupov A.V., Antsupov V.P. et al. [Modelling the onset of failures in metallurgical machines]. Magnitogorsk: Izd-vo Magnitogorsk; 2021. (in Russ.)
35. Testodov N.A., Mikhnev M.M., Mikheev A.E. et al. [Spacecraft manufacturing process]. Krasnoyarsk: SibSAU; 2009. (in Russ.)
36. Bolotin V.V. [Theory of dependability of mechanical systems with a finite number of degrees of freedom]. *Izvestiya AN SSSR. Mechanics of solids* 1969;5:74-81. (in Russ.)
37. Pronikov A.S. [Parametric dependability of machines]. Moscow: Bauman MSTU Publishing; 2002. (in Russ.)
38. Gawande A. *The Checklist Manifesto: How to Get Things Right*. Moscow: OOO Alpina Publisher; 2014.
39. Gnedenko B.V., Beliaev Yu.K., Soloviev A.D. [Mathematical methods in the dependability theory. Primary dependability characteristics and their statistical analysis]. Moscow: Nauka; 1965. (in Russ.)
40. Dhillon B., Singh C. *Engineering Reliability*. Moscow: Mir; 1984.
41. Belov A.V., Boreysho A.S., Morozov A.V. et al. [Design and dependability of special-purpose laser systems]. Saint Petersburg: BGTU; 2014. (in Russ.)
42. Pokhabov Yu.P. Design engineering approach to ensuring specified dependability. Case study of unique, highly critical systems with short operation life. *Dependability* 2022;1:20-29.

43. Gorokhova V.V. [Application of the Saratov system in research and design]. Moscow: Izdatelstvo standartov; 1969. (in Russ.)

44. Dubovikov B.A. [Fundamentals of scientific quality management (practical experience and theoretical substantiation of the system for defect-free work organization). Moscow: Ekonomika; 1966. (in Russ.)

45. Pokhabov Yu.P. Dependability from a designer's standpoint. *Dependability* 2020;4:13-20.

46. Reason J. Human Error. Cambridge: University Press; 1990.

47. Pokhabov Yu.P. [Design engineering analysis of dependability. A method book (using the example of spacecraft separation system)]. Zheleznogorsk: AO NPO GV MKB; 2020. (accessed 16.02.2022). Available at: http://www.gnedenko.net/new_books/Pokhabov2021.pdf. (in Russ.)

48. Timashev S.A., Pokhabov Yu.P. [Problems of comprehensive analysis and assessment of individual design dependability of spacecraft (with the example of rotating structures)]. Ekaterinburg: AMB; 2018. (in Russ.)

49. Tarasenko F.P. [Applied systems analysis]. Moscow: KNORUS; 2017. (in Russ.)

50. Blekhman I.I. [Vibration mechanics]. Moscow: Fizmatlit; 1994. (in Russ.)

51. Doronin S.V., Pokhabov Yu.P. [Improving the reliability of structural strength estimates of technical facilities]. *Vestnik mashinostroyeniya* 2013;6:85-88. (in Russ.)

52. Pokhabov Yu.P., Shendalev D.O., Kolobov A.Y., Nagovitsyn V.N., Ivanov E.A. To the question of establishing safety coefficient and assurance coefficient at a given probability of non-destruction of load-bearing structures. *Siberian Aerospace Journal* 2021;22(1):166-176. Doi: 10.31772/2712-8970-2021-22-1-166-176.

53. Gladky V.F. Probabilistic methods of aircraft structural design. Moscow: Nauka; 1982. (in Russ.)

54. Biriukov G.P., Kukushkin Yu.F., Torpachev A.V. [Fundamentals of dependability and safety of launch facilities]. Moscow: MAI Publishing; 2002. (in Russ.)

55. Pokhabov Yu.P., Nagovitsyn V.N. [A method for securing items with a statically undeterminable system of connections]. Pat. 2125528 Rus. Federation. MPK B64G 1/44/ No. 5067373/28; appl. 29.09.1992; publ. 27.01.1999. Bul. No. 3. (in Russ.)

56. Pokhabov Yu.P., Grinevich V.V. [Method for securing items]. Patent 2230945 Russian Federation. MPK F16B 1/00. No. 2002113143/11. Appl. 18.05.2002. Publ. 20.06.2004. Bul. No. 17. (in Russ.)

57. Pokhabov Yu.P., Nagovitsyn V.N. [Bolted connection of details out of different materials with different coefficients of thermal expansion]. Pat. 2263827 Rus. Federation. MPK F16B 5/02/ No. 2003112578/11; appl. 28.04.2003; publ. 20.10.2004. Bul. No. 31. (in Russ.)

58. Shishmariov V.Yu. [Dependability of technical systems]. Moscow: Academia; 2010. (in Russ.)

Сведения об авторе

Похабов Юрий Павлович – кандидат технических наук, главный специалист, АО «НПО ПМ МКБ», e-mail: pokhabov_yury@mail.ru.

About the author

Yury P. Pokhabov, Candidate of Engineering, Chief Specialist, AO NPO PM MKB, e-mail: pokhabov_yury@mail.ru.

Вклад автора в статью

В статье предложен метод проектирования и конструирования механизмов космического назначения с заданной надежностью на основе использования методики конструкторско-технологического анализа надежности, что является результатом авторского цикла публикаций в журнале «Надежность» за 2015–2022 гг.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Об одной задаче расчета комплекта запасных элементов, имеющих отказы двух типов

On a problem of calculating a set of spare parts that have two types of failures

Антонов А.В.¹, Чепурко В.А.^{2*}

Antonov A.V.¹, Chepurko V.A.^{2*}

¹АНО ДПО Техническая академия Росатома, Обнинск, Российская Федерация, ²АО РАСУ, Москва, Российская Федерация

¹Rosatom Technical Academy, Obninsk, Russian Federation, ²JSC RASU, Moscow, Russian Federation

*VACHepurko@rasu.ru



Антонов А.В.



Чепурко В.А.

Резюме. Цель. Цель данной работы, являющейся продолжением [24], состоит в построении алгоритма, позволяющего найти необходимое количество запасных изделий (ЗИП) для сложной системы, элементы которой могут быть как ремонтпригодными, так и неремонтпригодными. В отличие от работы [24], в качестве обобщения, в статье вводятся дополнительные неработоспособные состояния. Эти состояния характеризуются простоями системы, связанными с заменой отказавшего элемента элементом из состава ЗИП. Если время замены отказавшего элемента не является пренебрежимо малой величиной по отношению к другим временным показателям обслуживаемой системы, то возникает необходимость в предлагаемом учете дополнительных неработоспособных состояний.

Методы. Используются Марковские модели для описания исследуемой технической системы. Выведена система уравнений Колмогорова для получения финальных вероятностей. Получено стационарное решение системы уравнений Колмогорова. Применяются классические методы теории вероятностей и математической теории надежности, некоторые специальные функции. **Выводы.** В статье формализуется задача определения необходимого количества ЗИП для системы с объектами, которые могут отказаться в случайный момент времени. При этом отказы могут быть двух типов. Первый тип отказов приводит объект в неработоспособное ремонтпригодное состояние. В этом случае восстановление объекта возможно в ремонтном подразделении предприятия, на котором объект эксплуатируется. Второй тип отказов, более катастрофичный, приводит объект в неработоспособное неремонтпригодное состояние и его восстановление возможно только на предприятии изготовителя или на специализированных ремонтных предприятиях. Для соответствующего процесса гибели и размножения построен Марковский граф. Формализованы уравнения для характерных состояний Марковского графа. Индукционно найдено стационарное решение системы уравнений Колмогорова. Доказана теорема об общем решении для всех состояний Марковского графа. В случае неограниченного восстановления решение значительно упрощается. Показано, что в предположении неограниченного восстановления и мгновенно производимых замен решение совпадает с решением, полученным ранее в упрощенном случае в работе [24]. Найдены предельные значения вероятностей неработоспособных критических и некритических состояний. Они позволяют сделать вывод о том, что в случае неограниченного восстановления увеличение объема ЗИП ведет к тому, что вероятность попадания в критическое состояние нехватки ЗИП постепенно обнуляется. При этом вероятность попадания в неработоспособное состояние, связанное с занимающей определенное время заменой отказавшего оборудования аналогом из числа ЗИП, определяется стационарным коэффициентом неготовности альтернирующего процесса восстановления. Общее решение задачи позволяет формализовать критерий достаточности ЗИП. Необходимое количество ЗИП определяется путем постепенного увеличения количества ЗИП до тех пор, пока вероятность неработоспособных критических событий не станет ниже заданной вероятности нехватки ЗИП. Приведен пример нахождения необходимого количества ЗИП.

Abstract. Aim. The paper, that continues [24], aims to develop an algorithm that would allow finding the required number of spare items (SPTA) for a complex system, whose elements may or may not be maintainable. Unlike in [24], as a generalisation, the paper introduces additional inoperable states. Those states are characterised by system downtime associated with the replacement of a failed element with an element from the SPTA. If the time of replacement of a failed element is not a negligibly small value as compared to other time indices of the serviced system, it becomes necessary, as suggested, to account for additional inoperable states.

Methods. Markov models are used for describing the technical system under consideration. The final probabilities were obtained using a developed system of Kolmogorov equations. A

stationary solution was obtained for the system of Kolmogorov equations. Classical methods of the probability theory and mathematical theory of dependability, some special functions were used. **Conclusions.** The paper formalizes the problem of determining the required number of SPTAs for a system with items that may fail at a random moment in time. The failures may be of two types. The first type of failures leaves an item in an inoperable repairable state. In this case, the item can be repaired in the maintenance unit of the company that operates such item. The second type of failures, a more catastrophic one, leaves the item in an inoperable non-repairable state, and it can be repaired only by the manufacturer or a specialized maintenance company. A Markov graph was built for the respective birth and death process. Equations were formalised for typical states of the Markov graph. A stationary solution was obtained for the system of Kolmogorov equations using induction. The theorem of general solution was proven for all the states of the Markov graph. In case of unlimited repair, the solution is significantly simplified. It was shown that, on an assumption of unlimited repair and momentary replacements, the solution matches the one earlier obtained in a simplified form in [24]. The limit values of the probabilities of inoperable critical and non-critical states were found. They allow concluding that, in case of unlimited repair, the growth of the size of SPTA causes the probability of a critical state of insufficient SPTA to tend to and become zero. Additionally, the probability of an inoperable state associated with the replacement of a failed item with an equivalent from the SPTA that takes a certain time is defined by a stationary unavailability of the alternating repair process. The general solution of the problem allows formalising the SPTA sufficiency coefficient. The required number of SPTAs is identified by progressively increasing the number of SPTAs until the probability of inoperable critical states is below the defined probability of SPTA shortage. An example of finding the required number of SPTAs is given.

Ключевые слова: Марковский анализ, граф, состояние графа, вероятность перехода, интенсивность отказов, интенсивность восстановления, интенсивность ремонта, стационарное решение.

Keywords: Markov analysis, graph, graph state, transition probability, failure rate, restoration rate, repair rate, stationary solution.

Для цитирования: Антонов А.В., Чепурко В.А. Об одной задаче расчета комплекта запасных элементов, имеющих отказы двух типов // Надежность. 2023. №2. С. 39-48. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-2-39-48>

For citation: Antonov A.V., Chepurko V.A. On a problem of calculating a set of spare parts that have two types of failures. Dependability 2023;2:39-48. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-2-39-48>

Поступила: 01.02.2023 / **После доработки:** 20.04.2023 / **К печати:** 15.06.2023

Received on: 01.02.2023 / **Revised on:** 20.04.2023 / **For printing:** 15.06.2023

Введение

При организации эксплуатации промышленных объектов, особенно объектов повышенного риска, таких как ядерные энергетические установки, летательные аппараты, химические комплексы и т.п., предъявляются высокие требования к обеспечению безопасности их функционирования. Особую актуальность вопросы безопасности имеют в области атомной энергетики. Принципиально важным условием развития атомно-энергетической отрасли является недопущение радиационного воздействия на окружающую среду и персонал, как атомной станции (АЭС), так и прилегающих к ней районов. Предотвращение аварий является одним из главных принципов безопасности и обеспечивается в первую очередь высокой надежностью оборудования и систем АЭС. Таким образом, вопросы поддержания надежности оборудования и систем АЭС имеют особую важность. Для поддержания надежности на высоком уровне на промышленном объекте планируются специальные мероприятия. К ним относятся: проведение

профилактического обслуживания оборудования и систем, контроль исправности функционирования объектов, создание комплектов запасных изделий (ЗИП) для оперативной замены вышедшего из строя оборудования.

В практике эксплуатации систем вопросы обоснования выбора состава запасных изделий, необходимых для бесперебойного функционирования оборудования, имеют первостепенное значение.

Вопросы расчета надежности оборудования с учетом ЗИП и определения его требуемого состава рассматривались в работах как российских, так и зарубежных специалистов.

Понятие запасного элемента впервые введено в 1964 году в работе [1].

Способы пополнения запасов и показатели достаточности комплектов ЗИП широко рассмотрены в работах [2, 3]. В 1970-х годах опубликованы работы [4, 5, 6], детализирующие стратегии пополнения запасов и предлагающие модели их учета при оценке характеристик комплектов ЗИП. Стратегия периодического пополнения запасов обсуждается в работе [7]. Модели функциониро-

вания ЗИП, в том числе при стратегиях периодического пополнения с экстренными доставками и пополнения по уровню, представлены в [8]. Вопросы оптимизации ЗИП рассмотрены в работе [9].

Можно констатировать, что данный вопрос не потерял своей актуальности до сих пор. Отметим некоторые работы, опубликованные уже в XXI веке. В работе [10] рассматривается метод расчета надежности систем с наличием запасных элементов. Стратегия функционирования системы предполагает, что в случае отказа элемента он заменяется резервным, а отказавший элемент поступает в ремонтный орган для восстановления. После ремонта элемент пополняет комплект ЗИП. В работе [11] решается задача оптимизации состава запасных элементов с учетом сложной стратегии их функционирования, в предположении, что отказавшее изделие подвергается ремонту. В работах [12, 13] излагается решение задачи оптимизации состава ЗИП при наличии ограничений на стоимость приобретения, доставки и хранения запасных элементов. В работах [14, 15] рассматриваются динамические модели управления составом запасных элементов на предприятии. В статьях [16, 17] решается задача оптимизации комплекта запасных элементов с учетом выработки данными элементами части ресурса. На основе методов теории восстановления решена задача расчета характеристик надежности системы в случае, когда запасные элементы могут находиться в холодном, теплом и горячем резерве. В работе [18] рассмотрена задача оптимизации комплекта ЗИП для элементов стареющего типа с учетом ограничений на стоимость запасных элементов. На основании методов теории восстановления получен коэффициент готовности системы, в состав которой входят элементы стареющего типа. В [19, 20] излагается задача расчета характеристик надежности систем, элементы которых в случае отказа заменяются работоспособными объектами из состава ЗИП, а отказавший элемент восстанавливается ремонтной бригадой и далее пополняет состав ЗИП. В данных работах учитывается старение объектов в процессе эксплуатации. В качестве модели, учитывающей старение элементов, используются геометрические процессы.

И, наконец, отметим фундаментальную работу [21], в которой приведен достаточно подробный анализ публикаций на тему расчетов надежности систем с учетом запасных элементов и расчетов необходимого количества ЗИП. Также в ней приведено описание различных моделей расчета показателей надежности с учетом ЗИП, в том числе в условиях периодического и непрерывного пополнения запасов в комплекте ЗИП, при периодическом пополнении запасов с экстренными доставками, рассмотрены вопросы оптимизации комплекта ЗИП. В данной работе также приведен достаточно подробный анализ публикаций на тему расчетов надежности систем с учетом запасных элементов, расчетов необходимого количества ЗИП. Выполнено описание различных моделей расчета показателей надежности с учетом ЗИП, в том числе в условиях периодического и непрерывного по-

полнения запасов в комплекте ЗИП, при периодическом пополнении запасов с экстренными доставками, рассмотрены вопросы оптимизации комплекта ЗИП. Следует также отметить, что вопросы расчета и оптимизации ЗИП представлены в соответствующих ГОСТах и РД (см., например, [22, 23]). Следует заметить, что вопрос расчета состава запасных изделий не потерял своей актуальности к настоящему времени и по-прежнему находится в поле зрения специалистов.

Постановка задачи

Рассмотрим функционирование объекта в составе сложной системы. В некоторый случайный момент времени объект может отказаться. Отказ объекта приводит его в неработоспособное состояние. Будем предполагать, что отказы могут быть двух типов. Первый тип отказов приводит объект в неработоспособное ремонтпригодное состояние. Второй тип отказов, более катастрофичный, приводит объект в неработоспособное неремонтпригодное состояние.

При первом типе отказа неработоспособный, но ремонтпригодный объект заменяется на работоспособный из состава ЗИП. То есть работоспособность системы восстанавливается за счет использования объекта из состава ЗИП. Интенсивность замены отказавшего элемента известна и равна μ . Далее неработоспособный блок передается для восстановления в ремонтный орган предприятия, на котором осуществляется использование объекта. В данном подразделении объект ремонтируют и возвращают в состав ЗИП. Интенсивность ремонта равна τ_2 .

При втором типе отказа на место отказавшего объекта устанавливается работоспособный блок из комплекта ЗИП. Интенсивность замены также равна μ . Неработоспособный и неремонтпригодный блок направляется установленным порядком для ремонта на предприятие-изготовитель, где его ремонтируют с интенсивностью τ_1 . Естественно предположить, что интенсивность ремонта при первом типе отказа будет существенно выше, чем при втором типе. Такого типа стратегии ремонта имеют место для сложных дорогостоящих систем, используемых в ядерной энергетике. Также такие стратегии используются в ряде других отраслей, например, для электронных систем, используемых в качестве бортового оборудования на летательных аппаратах.

Требуется определить объем необходимого комплекта ЗИП таким образом, чтобы вероятность исчерпания ЗИП была не выше заданного уровня.

Построение математической модели

Для расчета необходимого количества ЗИП на предполагаемом промежутке времени будем использовать математическую модель, состоящую в том, что процесс замены осуществляется с возможностью ремонта отказавших элементов, как было описано выше.

Описанная модель соответствует случайному процессу гибели и размножения, который характеризуется графом состояний (рис. 1). Будем считать, что поток отказов подчиняется трем известным свойствам: ординарности, отсутствия последствия и стационарности. Цветом выделены критические состояния, означающие истощение ЗИП.

При построении модели будем использовать обозначения:

- n – количество однотипных элементов в системе;
- k – планируемый объем ЗИП;
- λ – интенсивность отказов одного элемента;
- μ – интенсивность замены отказавшего элемента;
- μ_0 – интенсивность ремонта неремонтопригодного объекта на предприятии промышленности;

μ_1 – интенсивность ремонта ремонтпригодного объекта, подлежащего ремонту на данном предприятии;

q – вероятность ремонтпригодности (оценивается статистически);

c – число ремонтных бригад;

T – планируемый промежуток времени обслуживания.

Состояния Марковского графа описываются трехкомпонентным вектором (a, b, d) , в котором a – состояние основного элемента (1 – работоспособное, 0 – неработоспособное), b – количество ремонтпригодных элементов, которые подлежат ремонту на данном предприятии, d – количество неремонтопригодных элементов, которые будут отремонтированы на предприятии промышленности, производящем данные объекты.

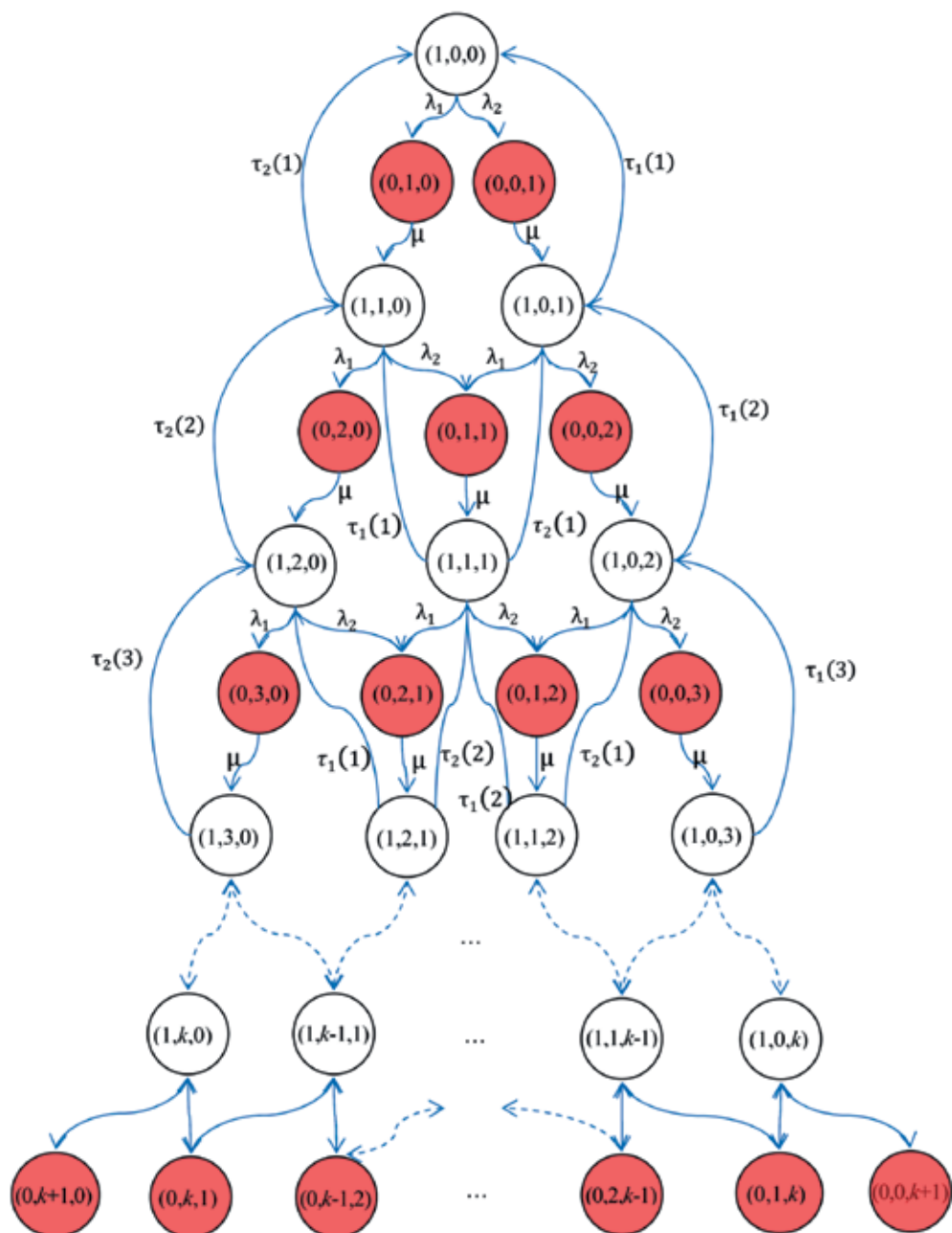


Рис. 1. Граф переходов процесса отказа, восстановления и ремонта объекта.

Определим интенсивности переходов в Марковском графе.

1. Интенсивность перехода «вниз и влево» из работоспособных состояний – $\lambda_{(1,b,d) \rightarrow (0,b+1,d)}$ происходящего в случае отказа и выявления того факта, что элемент ремонтпригоден будет определяться выражением:

$$\begin{aligned} \lambda_{(1,b,d) \rightarrow (0,b+1,d)} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Pr(A_1 \cdot R; t, \Delta t)}{\Delta t} = \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Pr(A_1; t, \Delta t) q}{\Delta t} = n\lambda q = \lambda_1, \end{aligned}$$

где A_1 – событие, состоящее в том, что на промежутке времени $(t, t + \Delta t)$ произошел один отказ, R – событие, обозначающее ремонтпригодность элемента.

2. Интенсивность перехода «вниз и вправо» из работоспособных состояний – $\lambda_{(1,b,d) \rightarrow (0,b,d+1)}$ происходящего в случае отказа и выявления того факта, что элемент неремонтпригоден будет определяться выражением:

$$\begin{aligned} \lambda_{(1,b,d) \rightarrow (0,b,d+1)} &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Pr(A_1 \cdot \bar{R}; t, \Delta t)}{\Delta t} = \\ &= \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{Pr(A_1; t, \Delta t)(1-q)}{\Delta t} = n\lambda(1-q) = \lambda_2. \end{aligned}$$

3. Интенсивность перехода «вверх и влево» из работоспособных состояний – $\lambda_{(1,b,d) \rightarrow (1,b,d-1)}$. Этот переход происходит в случае восстановления неремонтпригодного объекта на предприятии промышленности:

$$\lambda_{(1,b,d) \rightarrow (1,b,d-1)} = \begin{cases} \min(b, c_1) \cdot \mu_0, & \text{если } c_1 \\ \text{ремонтных бригад,} & \\ b\mu_0, & \text{если число} \\ \text{бригад неограничено.} \end{cases} = \tau_1(b), b = 1, 2, \dots$$

4. Интенсивность перехода «вверх и вправо» из работоспособных состояний – $\lambda_{(1,b,d) \rightarrow (1,b-1,d)}$. Этот переход происходит в случае восстановления ремонтпригодного объекта подлежащего ремонту на данном предприятии:

$$\lambda_{(1,b,d) \rightarrow (1,b-1,d)} = \begin{cases} \min(a, c_2) \cdot \mu_1, & \text{если } c_2 \\ \text{ремонтных бригад,} & \\ a\mu_1, & \text{если число} \\ \text{бригад неограничено.} \end{cases} = \tau_2(a), a = 1, 2, \dots$$

5. Интенсивность перехода «вниз» из неработоспособных состояний за исключением критических в последней строке вершин графа – $\lambda_{(0,b,d) \rightarrow (1,b,d)}$. Этот переход происходит в случае замены неремонтпригодного объекта из числа ЗИП:

$$\lambda_{(0,b,d) \rightarrow (1,b,d)} = \mu, b + d \leq k.$$

6. Интенсивность перехода «вверх и влево» из критических состояний – $\lambda_{(0,b,d) \rightarrow (1,b,d-1)}$. Этот переход происходит в случае восстановления ремонтпригодного объекта:

$$\lambda_{(0,b,d) \rightarrow (1,b,d-1)} = \begin{cases} \min(b, c_1) \cdot \mu_0, & \text{если } c_1 \\ \text{ремонтных бригад,} & \\ b\mu_0, & \text{если число} \\ \text{бригад неограничено.} \end{cases} = \tau_1(b), b = 1, 2, \dots$$

7. Интенсивность перехода «вверх и вправо» из критических состояний – $\lambda_{(0,b,d) \rightarrow (1,b-1,d)}$. Этот переход происходит в случае восстановления ремонтпригодного объекта:

$$\lambda_{(0,b,d) \rightarrow (1,b-1,d)} = \begin{cases} \min(a, c_2) \cdot \mu_1, & \text{если } c_2 \\ \text{ремонтных бригад,} & \\ a\mu_1, & \text{если число} \\ \text{бригад неограничено.} \end{cases} = \tau_2(a), a = 1, 2, \dots$$

Для данной стратегии напомним систему уравнений Колмогорова для общего случая.

Уравнения для вероятностей состояний вида $(1, i, j)$, $i = 0, 1, \dots, k-1, j = 0, \dots, k-1$ так, что $i + j \leq k-1$ определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} P'_{1,i,j} &= -(\lambda_1 + \lambda_2 + \tau_1(j) + \tau_2(i))P_{1,i,j} + \mu P_{0,i,j} + \\ &+ \tau_2(i+1)P_{1,i+1,j} + \tau_1(j+1)P_{1,i,j+1}. \end{aligned} \quad (1)$$

Уравнения для вероятностей состояний вида $(1, i, j)$, $i = 0, 1, \dots, k, j = k-i$ определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} P'_{1,i,j} &= -(\lambda_1 + \lambda_2 + \tau_1(j) + \tau_2(i))P_{1,i,j} + \mu P_{0,i,j} + \\ &+ \tau_2(i+1)P_{0,i+1,j} + \tau_1(j+1)P_{0,i,j+1}. \end{aligned} \quad (2)$$

При этом очевидно считать, что $\tau_1(0) = \tau_2(0) = P_{0,0,0} = P_{1,-1,j} = P_{1,i,-1} = 0, i, j \in \{0, 1\}$.

Уравнения для вероятностей неработоспособных состояний вида $(0, i, j)$, $i = 0, 1, \dots, k, j = 0, \dots, k$ так, что $i + j \leq k$ определяются следующим образом:

$$P'_{0,i,j} = -\mu P_{0,i,j} + \lambda_1 P_{1,i-1,j} + \lambda_2 P_{1,i,j-1}. \quad (3)$$

При этом очевидно считать, что $P_{0,-1,j} = P_{0,i,-1} = 0, i, j \in \{0, 1\}$.

Уравнения для вероятностей неработоспособных критических состояний вида $(0, i, j)$, $i = 0, 1, \dots, k+1, j = k+1-i$ определяются следующим образом:

$$P'_{0,i,j} = -(\tau_1(j) + \tau_2(i))P_{0,i,j} + \lambda_1 P_{1,i-1,j} + \lambda_2 P_{1,i,j-1}. \quad (4)$$

Будем искать стационарное решение системы дифференциальных уравнений Колмогорова. Заметим, что $\lambda_1 + \lambda_2 = n\lambda$.

Для случая $i = 0, 1, \dots, k, j = 0, \dots, k, i + j \leq k - 1$:

$$\begin{aligned} (n\lambda + \tau_1(j) + \tau_2(i))P_{1,i,j} = \\ = \mu P_{0,i,j} + \tau_2(i+1)P_{1,i+1,j} + \tau_1(j+1)P_{1,i,j+1}. \end{aligned} \quad (5)$$

Для случая $(1, i, j), i = 0, 1, \dots, k, j = k - i$:

$$\begin{aligned} (n\lambda + \tau_1(j) + \tau_2(i))P_{1,i,j} = \\ = \mu P_{0,i,j} + \tau_2(i+1)P_{0,i+1,j} + \tau_1(j+1)P_{0,i,j+1}. \end{aligned} \quad (6)$$

Для вероятностей состояний вида $(0, i, j), i = 0, 1, \dots, k, j = 0, \dots, k$ так, что $i + j \leq k$ стационарные уравнения определяются следующим образом:

$$\mu P_{0,i,j} = \lambda_1 P_{1,i-1,j} + \lambda_2 P_{1,i,j-1}. \quad (7)$$

Для вероятностей критических состояний $i = 0, 1, \dots, k+1, j = k+1-i$:

$$(\tau_1(j) + \tau_2(i))P_{0,i,j} = \lambda_1 P_{1,i-1,j} + \lambda_2 P_{1,i,j-1}. \quad (8)$$

Будем искать решение по индукции.

Пусть $k=0$ Получаем $(k+1)(k+3)=3$ уравнения:

$$\begin{cases} n\lambda P_{1,0,0} = \tau_2(1)P_{1,1,0} + \tau_1(1)P_{1,0,1} \\ \tau_1(1)P_{0,0,1} = \lambda_2 P_{1,0,0} \\ \tau_2(1)P_{0,1,0} = \lambda_1 P_{1,0,0} \end{cases} \quad (9)$$

После несложных преобразований получаем:

$$\begin{aligned} P_{1,0,0} &= \left(1 + \frac{\lambda_2}{\tau_1(1)} + \frac{\lambda_1}{\tau_2(1)}\right)^{-1}, \\ P_{0,1,0} + P_{0,0,1} &= 1 - P_{1,0,0} = \frac{\frac{\lambda_2}{\tau_1(1)} + \frac{\lambda_1}{\tau_2(1)}}{1 + \frac{\lambda_2}{\tau_1(1)} + \frac{\lambda_1}{\tau_2(1)}}. \end{aligned}$$

Пусть $k=1$ Получаем $(k+1)(k+3)=8$ уравнений:

$$\begin{cases} n\lambda P_{1,0,0} = \tau_2(1)P_{1,1,0} + \tau_1(1)P_{1,0,1} \\ (n\lambda + \tau_1(1))P_{1,0,1} = \mu P_{0,0,1} + \tau_2(1)P_{0,1,1} + \tau_1(2)P_{0,0,2} \\ (n\lambda + \tau_2(1))P_{1,1,0} = \mu P_{0,1,0} + \tau_2(2)P_{0,2,0} + \tau_1(1)P_{0,1,1} \\ \tau_1(2)P_{0,0,2} = \lambda_2 P_{1,0,1} \\ (\tau_1(1) + \tau_2(1))P_{0,1,1} = \lambda_1 P_{1,0,1} + \lambda_2 P_{1,1,0} \\ \tau_2(2)P_{0,2,0} = \lambda_1 P_{1,1,0} \\ \mu P_{0,0,1} = \lambda_2 P_{1,0,0} \\ \mu P_{0,1,0} = \lambda_1 P_{1,0,0} \end{cases} \quad (10)$$

По аналогии получаем решение:

$$P_{1,0,0} = \left(1 + \frac{\lambda_1}{\mu} + \frac{\lambda_1}{\tau_2(1)} + \frac{\lambda_2}{\tau_1(1)} + \frac{\lambda_1^2}{\tau_2(1)\tau_2(2)} + \frac{\lambda_1\lambda_2}{\tau_1(1)\tau_2(1)} + \frac{\lambda_2^2}{\tau_1(1)\tau_1(2)}\right)^{-1}. \quad (11)$$

Вероятность попадания в неработоспособное состояние

$$\begin{aligned} P_{0,0,2} + P_{0,1,1} + P_{0,2,0} + P_{0,0,1} + P_{0,1,0} = \\ = \left(\frac{\lambda_1^2}{\tau_2(1)\tau_2(2)} + \frac{\lambda_1\lambda_2}{\tau_1(1)\tau_2(1)} + \frac{\lambda_2^2}{\tau_1(1)\tau_1(2)} + \frac{\lambda_1}{\mu}\right)P_{1,0,0}. \end{aligned} \quad (12)$$

Анализируя полученный результат, формулируем следующий вывод.

Теорема. Общее решение для всех состояний, кроме неработоспособных не критических

$$P_{1,i,j} = \frac{\lambda_1^i \lambda_2^j}{\left(\prod_{m=1}^j \tau_1(m)\right) \times \left(\prod_{m=1}^i \tau_2(m)\right)} P_{1,0,0}, \quad (13)$$

при условии $\prod_{m=1}^0 \tau_i(m) = 1$.

Для неработоспособных не критических состояний вероятности определяются выражением (7).

Доказательство. Подставим решение в правую часть уравнения (5) предполагая, что $(0, i, j)$ – неработоспособные не критические состояния, т.е. $i = 0, 1, \dots, k, j = 0, \dots, k, i + j \leq k - 1$:

$$\begin{aligned} \mu P_{0,i,j} + \tau_2(i+1)P_{1,i+1,j} + \tau_1(j+1)P_{1,i,j+1} &= \lambda_1 P_{1,i-1,j} + \\ &+ \lambda_2 P_{1,i,j-1} + \tau_2(i+1)P_{1,i+1,j} + \tau_1(j+1)P_{1,i,j+1} = \\ &= \frac{\lambda_1^i \lambda_2^j (\tau_1(j) + \tau_2(i) + \lambda_1 + \lambda_2)}{\left(\prod_{m=1}^j \tau_1(m)\right) \times \left(\prod_{m=1}^i \tau_2(m)\right)} P_{1,0,0} = (n\lambda + \tau_1(j) + \tau_2(i))P_{1,i,j}. \end{aligned}$$

Предполагая, что $i = 0, 1, \dots, k, j = k - i$ и подставляя (7) в (6) получим такой же результат. Наконец, выполнение (8) доказывается аналогично.

Упростим (7):

$$P_{0,i,j} = \frac{\tau_1(j) + \tau_2(i)}{\mu} P_{1,i,j}.$$

Из условия нормировки получаем уравнение.

$$\begin{aligned} 1 &= P_{1,0,0} + P_{1,0,0} \sum_{i=0}^{k+1} \frac{\lambda_1^i \lambda_2^{k+1-i}}{\left(\prod_{m=1}^{k+1-i} \tau_1(m)\right) \times \left(\prod_{m=1}^i \tau_2(m)\right)} + \\ &+ \sum_{\substack{i,j=0 \\ 1 \leq i+j \leq k}}^k \left(1 + \frac{\tau_1(j) + \tau_2(i)}{\mu}\right) P_{1,i,j}. \end{aligned} \quad (14)$$

В случае ограниченного восстановления получаем решение для $P_{1,0,0}$

$$P_{1,0,0} = \left[1 + \sum_{i=0}^{k+1} \frac{\lambda_1^i \lambda_2^{k+1-i}}{\left(\prod_{m=1}^{k+1-i} \tau_1(m) \right) \times \left(\prod_{m=1}^i \tau_2(m) \right)} + \sum_{\substack{i,j=0 \\ 1 \leq i+j \leq k}}^k \left(1 + \frac{\tau_1(j) + \tau_2(i)}{\mu} \right) \frac{\lambda_1^i \lambda_2^j}{\left(\prod_{m=1}^j \tau_1(m) \right) \times \left(\prod_{m=1}^i \tau_2(m) \right)} \right]^{-1}. \quad (15)$$

Если неограниченное восстановление, то суммы в (14) можно упростить.

Первая сумма представляет собой бином Ньютона.

$$\sum_{i=0}^{k+1} \frac{\lambda_1^i \lambda_2^{k+1-i}}{\left(\prod_{m=1}^{k+1-i} \tau_1(m) \right) \times \left(\prod_{m=1}^i \tau_2(m) \right)} = \frac{1}{(k+1)!} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_0} \right)^{k+1}.$$

Вторая сумма вероятностей сводится к конечному разложению экспоненты в ряд Тейлора

$$\sum_{\substack{i,j=0 \\ 1 \leq i+j \leq k}}^k P_{1,i,j} = P_{1,0,0} \left(\sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^{k-i} \frac{\lambda_1^i \lambda_2^j}{\left(\prod_{m=1}^j \tau_1(m) \right) \times \left(\prod_{m=1}^i \tau_2(m) \right)} - 1 \right) = P_{1,0,0} \left(e_k \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_0} \right) - 1 \right), k = 0, 1, \dots,$$

где $e_k(x) = 1 + x + \dots + \frac{x^k}{k!}$.

Третья сумма также сводится к конечному разложению экспоненты в ряд Тейлора.

$$\sum_{\substack{i,j=0 \\ 1 \leq i+j \leq k}}^k (\tau_1(j) + \tau_2(i)) P_{1,i,j} = P_{1,0,0} \lambda n e_{k-1} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_0} \right).$$

Уравнение (14) существенно упростится:

$$P_{1,0,0} = \left[e_{k+1} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_0} \right) + \frac{\lambda n}{\mu} e_{k-1} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_0} \right) \right]^{-1}. \quad (16)$$

Вероятность неработоспособных критических событий

$$Q_1(k) = \sum_{i=0}^{k+1} \frac{\lambda_1^i \lambda_2^{k+1-i}}{\left(\prod_{m=1}^{k+1-i} \tau_1(m) \right) \times \left(\prod_{m=1}^i \tau_2(m) \right)} P_{1,0,0} = \frac{\frac{1}{(k+1)!} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_0} \right)^{k+1}}{e_{k+1} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_0} \right) + \frac{\lambda n}{\mu} e_{k-1} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_0} \right)}. \quad (17)$$

Вероятность неработоспособных некритических событий

$$Q_2(k) = \sum_{\substack{i,j=0 \\ 1 \leq i+j \leq k}}^k \frac{\tau_1(j) + \tau_2(i)}{\mu} P_{1,i,j} = \frac{\frac{\lambda n}{\mu} e_{k-1} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_0} \right)}{e_{k+1} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_0} \right) + \frac{\lambda n}{\mu} e_{k-1} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_0} \right)}. \quad (18)$$

Вероятность неработоспособных состояний в случае неограниченного восстановления

$$Q(k) = Q_1(k) + Q_2(k) = \frac{\frac{1}{(k+1)!} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_0} \right)^{k+1} + \frac{\lambda n}{\mu} e_{k-1} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_0} \right)}{e_{k+1} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_0} \right) + \frac{\lambda n}{\mu} e_{k-1} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_0} \right)}. \quad (19)$$

Если положить $\mu = \infty$ (замена происходит мгновенно), то получается результат, изложенный авторами в работе [24].

Легко показать, что

$$\lim_{k \rightarrow \infty} Q_1(k) = 0, \quad \lim_{k \rightarrow \infty} Q(k) = \lim_{k \rightarrow \infty} Q_2(k) = \frac{\lambda n}{\lambda n + \mu}. \quad (20)$$

Это означает, что в случае неограниченного восстановления увеличение объема ЗИП ведет к тому, что вероятность попадания в критическое состояние нехватки ЗИП постепенно обнуляется. При этом вероятность попадания в неработоспособное состояние, связанное с занимающей определенное время заменой отказавшего оборудования аналогом из числа ЗИП определяется стационарным коэффициентом неготовности альтернирующего процесса восстановления.

В случае ограниченного восстановления:

$$Q_1(k) = \sum_{i=0}^{k+1} \frac{\lambda_1^i \lambda_2^{k+1-i}}{\left(\prod_{m=1}^{k+1-i} \tau_1(m) \right) \times \left(\prod_{m=1}^i \tau_2(m) \right)} P_{1,0,0}, \quad (21)$$

$$Q_2(k) = \sum_{\substack{i,j=0 \\ 1 \leq i+j \leq k}}^k \frac{\tau_1(j) + \tau_2(i)}{\mu} \frac{\lambda_1^i \lambda_2^j}{\left(\prod_{m=1}^j \tau_1(m) \right) \times \left(\prod_{m=1}^i \tau_2(m) \right)} P_{1,0,0}. \quad (22)$$

Вероятность $P_{1,0,0}$ определяется выражением (15).

Критерий определения необходимого объема ЗИП – k формулируется классическим образом. Объем k увеличивается до тех пор, пока не выполнится неравенство:

$$Q_1(k) \leq \varepsilon, \quad (23)$$

где ε – задаваемая вероятность нехватки ЗИП.

Пример расчета необходимого числа запасных элементов

В качестве примера расчета необходимого числа запасных элементов рассмотрим некоторые электронные компоненты, функционирующие в составе системы управления энергетическим объектом. Рассмотрим исходные данные для расчета:

– количество однотипных объектов в системе: $n = 30$ единиц;

– интенсивность отказов одного объекта: $\lambda = 2,92 \cdot 10^{-5}$ 1/час;

– интенсивность замены: $\mu = 0,01$ 1/час;

– интенсивность восстановления работоспособности неремонтопригодного объекта на заводе изготовителе: $\mu_0 = 1,389 \cdot 10^{-3}$ 1/час;

– интенсивность восстановления работоспособности ремонтпригодного объекта на предприятии, где осуществляется его функционирование: $\mu_1 = 4,167 \cdot 10^{-2}$ 1/час;

– вероятность ремонтпригодности: $q = 0,6875$;

– число ремонтных бригад: $c = \infty$;

– вероятность достаточности ЗИП: $1 - \varepsilon = 0,999$.

Для расчетов будем использовать выражение (17). Приведем вспомогательные выкладки:

$$\lambda_1 = n\lambda q = 6,02 \cdot 10^{-4} \text{ 1/час.}$$

$$\lambda_2 = n\lambda(1 - q) = 2,74 \cdot 10^{-4} \text{ 1/час.}$$

$$\frac{\lambda n}{\mu} = 8,76 \cdot 10^{-2}.$$

$$\frac{\lambda_1}{\mu_1} = 1,45 \cdot 10^{-2}.$$

$$\frac{\lambda_2}{\mu_0} = 1,97 \cdot 10^{-1}.$$

$$\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_0} = 2,12 \cdot 10^{-1}.$$

Для вычисления $e_n(x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!}$ был написан макрос.

Результат расчетов необходимого объема ЗИП при различных k приведен в таблице 1.

Расчет по разработанной методике показывает, что необходимое количество запасных электронных компонентов, удовлетворяющее заданной вероятности достаточности ЗИП, равно 3 единицам, поскольку $6,21 \cdot 10^{-5} < \cdot 10^{-3}$.

В случае ограниченного восстановления авторами был также разработан соответствующий макрос, рассчитывающий (19). Так, в случае наличия одной обслуживающей бригады необходимый объем ЗИП увеличивается до 4 единиц при тех же остальных исходных данных. При двух и более бригадах достаточно 3 единиц ЗИП.

Заключение

Таким образом, рассмотрена задача обеспечения запасными элементами сложного дорогостоящего оборудования, подверженного двум типам отказов. В одном случае в результате отказа объект переходит в неработоспособное ремонтпригодное состояние и его восстановление возможно в ремонтном подразделении предприятия, на котором объект эксплуатируется. Во втором случае в результате отказа объект переходит в неработоспособное неремонтопригодное состояние и его восстановление возможно только на предприятии изготовителе или на специализированных ремонтных предприятиях. Ввиду высокой стоимости объекта его экономически целесообразнее доставить на специализированное предприятие и выполнить восстановление.

Данная модель может найти применение для расчета состава запасных изделий сложных дорогостоящих электронных систем атомной энергетики. Модель также может быть использована при обосновании состава ЗИП в ряде других отраслей промышленности, например, в области авиации и ракетной техники, при организации работы химического производства и т.п., в отраслях для которых вопросы безопасности и надежности имеют большое значение.

Библиографический список

1. Шишонков Н.А., Репкин В.Ф., Барвинский Л.Л. Основы теории надежности и эксплуатации радиоэлектронной аппаратуры. М.: Сов. радио, 1964. 552 с.

Табл. 1. Вероятность нехватки ЗИП при различных k .

k	0	1	2	3
$\frac{1}{(k+1)!} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_0} \right)^{k+1}$	$2,12 \cdot 10^{-1}$	$2,24 \cdot 10^{-2}$	$1,58 \cdot 10^{-3}$	$8,35 \cdot 10^{-5}$
$e_{k+1} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_0} \right)$	1,21	1,23	1,24	1,24
$\frac{\lambda n}{\mu} e_{k-1} \left(\frac{\lambda_1}{\mu_1} + \frac{\lambda_2}{\mu_0} \right)$	0,00	$8,76 \cdot 10^{-2}$	$1,06 \cdot 10^{-1}$	$1,08 \cdot 10^{-1}$
$Q_1(k)$	$1,75 \cdot 10^{-1}$	$1,69 \cdot 10^{-2}$	$1,18 \cdot 10^{-3}$	$6,21 \cdot 10^{-5}$

2. Пославский О.Ф. Методические вопросы разработки и оценки ЗИП. Часть 1. Общие положения теории ЗИП. М.: Знание, 1968. 96 с.

3. Пославский О.Ф. Методы расчета числа запасных частей. М.: Знание, 1977. 90 с.

4. Гоголевский В.Б., Грабовецкий В.П. Определение числа запасных элементов и блоков, обеспечивающих заданную надежность аппаратуры. В кн.: Основные вопросы теории и практики надежности. М.: Сов. радио, 1971.

5. Захарин А.М., Кандаков В.Ф. Оптимальная стратегия пополнения ЗИП в ремонтном контуре системы обслуживания // Надежность и контроль качества. 1979. № 2. С. 18-24.

6. Конев В.В. Об оптимальном обеспечении группы приборов однотипными запасными элементами // Надежность и контроль качества. 1978. № 3. С. 43-49.

7. Сафаров Б.Е. К выводу основных показателей модели периодического пополнения регионального склада запасными частями при наличии экстренных поставок произвольной величины // Вопросы радиоэлектроники. Серия ЭВТ. 1983. Вып. 14. С. 54-61.

8. Надежность технических систем. Справочник / Под ред. И.А. Ушакова / Глава 14. Обеспечение технических объектов запасными элементами / А.Э. Шура-Бура. М.: Радио и связь, 1985. С. 205-233.

9. Сафаров Б.Е. Задача управления запасами в централизованной системе технического обслуживания СВТ. М.: Знание, 1986. 126 с.

10. Антонов А.В., Пляскин А.В. К вопросу расчета надежности системы с ограниченным количеством запасных элементов // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2000. № 2. С. 12-23.

11. Антонов А.В., Пляскин А.В., Чепурко В.А. Оптимизация числа запасных элементов оборудования, важных для безопасности АЭС // Методы менеджмента качества. 2001. № 8. С. 27-31.

12. Антонов А.В., Пляскин А.В. Определение оптимального количества запасных элементов системы с учетом ограничений на стоимость // Надежность. 2003. № 4. С. 9-16.

13. Антонов А.В., Пляскин А.В., Татаев Х.Н. Оптимизация состава запасных изделий энергоблоков АЭС методом нелинейного программирования // Обозрение прикладной и промышленной математики. 2011. Т. 18. Выпуск 1. С. 100-101.

14. Чепурко В.А., Унщиков А.П. Об одной динамической модели управления запасами на предприятии // Надежность. 2009. № 4. С. 22-28.

15. Чепурко В.А., Унщиков А.П. Исследование динамических моделей управления запасами на предприятии // Надежность. 2010. № 3. С. 40-47.

16. Антонов А.В., Пляскин А.В., Татаев Х.Н. К вопросу оптимизации комплекта запасных изделий с учетом частичной выработки их ресурса // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 1. С. 1-8.

17. Антонов А.В., Пляскин А.В., Татаев Х.Н. Повышение качества функционирования систем управления

за счет оптимизации состава запасных элементов // Качество, инновации, образование. 2012. № 7. С. 51-56.

18. Антонов А.В., Пляскин А.В., Татаев Х.Н. Оптимизация состава запасных изделий энергоблоков АЭС с учетом частичной выработки их ресурса // Ядерная физика и инжиниринг. 2012. Т. 3. № 5. С. 408-415.

19. Антонов А.В., Пляскин А.В., Татаев Х.Н. К вопросу расчета надежности резервированных структур с учетом старения элементов // Надежность. 2013. № 1(44). С. 55-61.

20. Antonov A., Plyaskin A. Tataev Kh. Calculation of the Redundant Structure Reliability for Aging type Elements. Pp. 383-390 / In book: Statistical Models and Methods for Reliability and Survival Analysis. Wiley-ISTE, Nov. 2013. 416 p.

21. Черкесов Г.Н. Оценка надежности систем с учетом ЗИП: учеб. пособие. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 480 с.

22. ГОСТ Р В 27.3.03-2005. Надежность военной техники. Оценка и расчет запасов в комплектах ЗИП.

23. РД В 319.01.19-98. Радиоэлектронные системы военного назначения. Методика оценки и расчета запасов в комплектах ЗИП.

24. Антонов А.В., Чепурко В.А. К вопросу расчета состава запасных элементов, имеющих отказы двух типов // Надежность. 2022. № 3. С. 21-28.

References

1. Shishonok N.A., Repkin V.F., Barvinsky L.L. [Foundations of the theory of dependability and operation of electronic equipment]. Moscow: Sovetskoye radio; 1964. (in Russ.)

2. Poslavsky O.F. [Methodological aspects of the development and evaluation of SPTA. Part 1. General provisions of the SPTA theory.]. Moscow: Znanie; 1968. (in Russ.)

3. Poslavsky O.F. [Methods for calculating the number of spare parts]. Moscow: Znanie; 1977. (in Russ.)

4. Gogolevsky V.B., Grabovetsky V.P. [Identifying the number of spare elements and units that ensure the specified dependability of equipment]. In: [Essentials of the theory and practice of dependability]. Moscow: Sovetskoye radio; 1971. (in Russ.)

5. Zakharin A.M., Kandakov V.F. [An optimal strategy of SPTA replenishment in the repair circuit of a maintenance system]. *Nadiozhnost i kontrol kachestva* 1979;2:18-24. (in Russ.)

6. Konev V.V. [On an optimal supply of a group of devices with single-type spare elements]. *Nadiozhnost i kontrol kachestva* 1978;3:43-49. (in Russ.)

7. Safarov B.E. [On the deduction of the primary indicators of the model of scheduled replenishment of a regional space part storage in the presence of emergency deliveries of production size]. *Voprosy radioelektroniki. Seria EVT* 1983;14:54-61. (in Russ.)

8. Shura-Bura A.E. [Chapter 14. Spare Part support of technical facilities]. In: Ushakov I.A., editor. [Dependabil-

ity of technical systems]. Moscow: Radio i sviaz; 1985. P. 205-233. (in Russ.)

9. Safarov B.E. [Managing reserves in a centralised communications and computer maintenance system]. Moscow: Znanie, 1986. (in Russ.)

10. Antonov A.V., Plyaskin A.V. On a Question of Calculation of Reliability of a System with Restricted Number of Spare Elements. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika* 2000;2:12-23. (in Russ.)

11. Antonov A.V., Plyaskin A.V., Chepurko V.A. [Optimizing the number of spare parts of safety-critical nuclear power plant equipment]. *Methods of quality management* 2001;8:27-31. (in Russ.)

12. Antonov A.V., Plyaskin A.V. [Identifying the optimal number of spare elements of a system subject to cost restrictions]. *Dependability* 2003;4:9-16. (in Russ.)

13. Antonov A.V., Plyaskin A.V., Tataev Kh.N. [Optimizing spare components of nuclear power plant reactors using nonlinear programming]. *Surveys on Applied and Industrial Mathematics* 2011;1(18):100-101. (in Russ.)

14. Chepurko V.A., Unshchikov A.P. [On a dynamic stock management model]. *Dependability* 2009;4:22-28. (in Russ.)

15. Chepurko V.A., Unshchikov A.P. [A research of dynamic models of managing company stocks]. *Dependability* 2010;3:40-47. (in Russ.)

16. Antonov A.V., Plyaskin A.V., Tataev K.N. Optimization of Spare Products and Devices Complete Sets Taking into Account the Reduction of its Resource. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* 2012;1:1-8. (in Russ.)

17. Antonov A.V., Plyaskin A.V., Tataev Kh.N. Improving Functioning of Control Systems by Force of Spare Elements Optimization. *Kachestvo, innovatsii, obrazovanie* 2012;7:51-56. (in Russ.)

18. Antonov A.V., Plyaskin A.V., Tataev H.N. [Optimizing the Spare Component Kit of Nuclear Power Plant Reactors Providing for Partial Depletion]. *Nuclear Physics and Engineering* 2012;3(5):408-415. (in Russ.)

19. Antonov A.V., Plyaskin A.V., Tataev H.N. On the Issue of Reliability Calculation for Redundant Structures in View of Ageing Elements. *Dependability* 2013;1:55-61. (in Russ.)

20. Antonov A., Plyaskin A. Tataev Kh. Calculation of the Redundant Structure Reliability for Aging type Elements. P. 383-390. In: *Statistical Models and Methods for Reliability and Survival Analysis*. Wiley-ISTE; Nov. 2013. 416 p.

21. Cherkesov G.N. [System dependability assessment with STPA taken into consideration: a textbook]. Saint Petersburg: BHV-Peterburg; 2012. (in Russ.)

22. GOST R V 27.3.03-2005. [Dependability of military hardware. Estimation and calculation of supplies in SPTA sets]. (in Russ.)

23. RD V 319.01.19-98. [Military electronic systems. Method for evaluating and calculating supplies in SPTA sets]. (in Russ.)

24. Antonov A.V., Chepurko V.A. On the calculation of a set of spare parts that have two types of failures. *Dependability* 2022;3:21-28.

Сведения об авторах

Антонов Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор, главный эксперт департамента международного сотрудничества и развития международного бизнеса Автономной некоммерческой организации дополнительного профессионального образования «Техническая академия Росатома», Курчатова, 21, Обнинск, Российская Федерация, e-mail: AVAntonov@rosatomtech.ru.

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.

About the authors

Alexander V. Antonov, Doctor of Engineering, Professor, Chief Expert, Department for International Cooperation and Global Business Development, Rosatom Technical Academy, 21 Kurchatova St., Obninsk, Russian Federation, e-mail: AVAntonov@rosatomtech.ru.

Valery A. Chepurko, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Chief Specialist, Division for Computational Substantiation of Design Solutions, JSC RASU, Moscow, Russian Federation, e-mail: VAChepurko@rasu.ru.

Вклад авторов в статью

Чепурко В.А. нашел общее решение.

Антонов А.В. провел обзор литературы, формализовал Марковский граф и нашел частные решения

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Оценка клиентоориентированных показателей и исследование надежности системы электроснабжения**

Evaluation of customer orientated indices and reliability study of electrical feeder system

Адितья Тивари^{1*}, Свати Тивари²
Aditya Tiwary^{1*}, Swati Tiwary²

¹Кафедра противопожарной техники и безопасности, Академия IPS, Институт технических и естественных наук, Раджендра Нагар, Индаур (штат Мадхья-Прадеш), Индия, ²Предприниматель, Виджай Нагар, Индаур, Индия
¹Dept. of Fire Technology & Safety Engineering, IPS Academy, Institute of Engineering and science, Rajendra Nagar, Indore (M.P), India, ²Entrepreneur, Vijay Nagar, Indore, India

*raditya2002@gmail.com



Адितья Тивари

Резюме. Цель. Оценка надежности системы, компонента или элемента очень важна в контексте прогнозирования ее готовности и других важных показателей. Надежность – это параметр, который является свидетельством готовности системы при надлежащих условиях эксплуатации в течение заданного периода времени. Исследование различных показателей надежности очень важно, учитывая сложную и неопределенную природу энергосистемы. **Методы.** В работе использованы классические методы теории надежности применительно к системе с постоянной интенсивностью отказов, состоящей из последовательно соединенных элементов. **Выводы.** В настоящей работе выполнен обзор литературы по теме оценки надежности систем электроснабжения. В частности, рассмотрены работы, в которых применялись: марковский подход на основе сечений, подход на основе условной вероятности, имитационные исследования распределительных систем, вероятностные модели, метод Монте-Карло, эквивалентные схемы надежности, метод выборки переходов состояний, методика оптимизации эксплуатационной готовности распределительных систем на основе инспекционного ремонта, метод на основе бутстрэппинга, анализ дерева отказов, метод на основе Байесовых сетей, модель разделения графика нагрузки на пики и впадины, модель реагирования спроса и другие. Авторами выполнена постановка задачи и проведен анализ исходных данных. В работе показано, что с физической точки зрения конфигурация системы будет представлять собой последовательную сеть надежности. При этом система выходит из строя даже при отказе одного компонента, и сохраняет работоспособность, если все компоненты сохраняют работоспособность. Отмечено, что при рассмотрении вопроса надежности последовательных систем тремя основными параметрами надежности являются средняя интенсивность отказов, среднее общее время восстановления в год и среднее время восстановления. В качестве клиентоориентированных показателей, связанных с исследованием надежности в работе применены индекс средней частоты прерываний электроснабжения (System average interruption frequency index, SAIFI), индекс средней длительности прерываний электроснабжения (System average interruption duration index, SAIDI) и индекс средней длительности прерывания электроснабжения одного потребителя (Customer average interruption duration index, CAIDI). На примере восьмиузловой радиальной распределительной системы выполнена оценка надежности по каждой распределительной секции, а также в каждой точке нагрузки. Для рассматриваемых распределительных секций точек нагрузки также получены три основных параметра надежности: средняя интенсивность отказов, среднее время отказа и среднее общее время отказа в год. Для радиальной распределительной системы оценены важные клиентоориентированные показатели: индекс средней частоты прерываний электроснабжения, индекс средней длительности прерываний электроснабжения и индекс средней длительности прерывания электроснабжения одного потребителя. Полученные данные позволяют охарактеризовать надежность и другие связанные с ней показатели, что является актуальным для систем распределения электроэнергии.

Abstract. Aim. Reliability evaluation of a system or component or element is very important in order to predict its availability and other relevant indices. Reliability is the parameter which tells about the availability of the system under proper working conditions for a given period of

** Aditya Tiwary, and Swati Tiwary. «Evaluation of Customer Orientated Indices and Reliability Study of Electrical Feeder System» Reliability: Theory & Applications, vol. 15, no. 3, 2020, pp. 36-43. doi:10.24411/1932-2321-2020-13003

time. The study of different reliability indices are very important considering the complex and uncertain nature of the power system. **Methods.** The study uses classical methods of the reliability theory in respect to a system with a constant failure rate consisting of series-connected elements. **Conclusions.** The paper reviews literature dedicated to the reliability estimation of power supply systems. In particular, the paper examined studies that employed the Markov cut-set approach, the conditional probability approach, distribution systems simulation, probabilistic models, the Monte Carlo method, reliability network equivalent, state transition sampling, inspection repair-based availability optimisation of distribution systems, bootstrapping, fault tree analysis, Bayes networks, peak-valley partition model, demand response model, etc. The authors defined the problem and analysed input data. They showed that, in physical terms, the system configuration will be a series reliability network. Given the above, the system fails even if one component fails, and survives if all of the components survive. It is noted that, when considering the reliability of series systems, the three basic parameters are average failure rate, average annual outage time and average repair time. As the customer orientated indices associated with the research of operational reliability the system average interruption frequency index (SAIFI), the system average interruption duration index (SAIDI) and the customer average interruption duration index (CAIDI) were used. Using the example of an eight-node radial distribution system, reliability was estimated for each distribution section, as well, as at each load point. For the examined distribution sections and load points, three basic reliability parameters were also obtained, i.e., the average failure rate, average outage time and average annual outage time. For a radial distribution system, important customer-oriented indices were estimated, i.e., system average interruption frequency index, system average interruption duration index and customer average interruption duration index. The resultant data allow characterizing reliability and other associated indices, which is relevant for power distribution systems.

Ключевые слова: надежность, готовность, система электроснабжения, индекс средней частоты прерываний электроснабжения, индекс средней длительности прерываний электроснабжения.

Keywords: reliability, availability, electrical feeder system, average interruption frequency index, system average interruption duration index.

Для цитирования: Адитья Тивари, Свати Тивари. Оценка клиентоориентированных показателей и исследование надежности системы электроснабжения // Надежность. 2023. №2. С. 49-56. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-2-49-56>

For citation: Aditya Tiwary, Swati Tiwary. Evaluation of customer orientated indices and reliability study of electrical feeder system. Dependability 2023;2:49-56. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-2-49-56>

Поступила: 27.02.2023 / **После доработки:** 20.04.2023 / **К печати:** 15.06.2023

Received on: 27.02.2023 / **Revised on:** 20.04.2023 / **For printing:** 15.06.2023

1. Введение

Оценка надежности системы, компонента или элемента очень важна в контексте прогнозирования ее готовности и других важных показателей. Надежность – это параметр, который является свидетельством готовности системы при надлежащих условиях эксплуатации в течение заданного периода времени. Сингхом и др. [1] предложен составной марковский подход на основе сечений к оценке надежности систем передачи и распределения, подверженных зависимым отказам. Биллинтоном и др. [2] определены показатели надежности в любой точке составной системы с помощью подхода на основе условной вероятности. Войчинским и др. [3] рассмотрены имитационные исследования распределительных систем, в которых изучается влияние распределений продолжительности прерывания и формы кривых стоимости на оценки стоимости прерывания. Вермой и др. [4] предложены новые показатели, отражающие интеграцию вероятностных моделей и нечетких понятий.

Чжэн и др. [5] разработали однокомпонентную модель и вывели выражение для готовности компонента с учетом допустимого времени восстановления. Джирутитижарун и Сингх [6] представили и проанализировали распределения показателей надежности, полученные с помощью двух методов выборки, а также с помощью метода Монте-Карло. Дзобо и др. [7] исследовали использование функции распределения вероятностей в анализе ценности надежности электроэнергетической системы. Пэ и Ким [8] представили аналитическую методику оценки надежности потребителей в микросети, включающей сети с распределенной генерацией. Биллинтоном и Ван [9] предложили подход к оценке надежности распределительной системы на основе эквивалента сети надежности.

Оценка индексов надежности с учетом отсутствия произвольного времени восстановления для распределительных систем при помощи моделирования по методу Монте-Карло предложена в [10]. Тивари и др.

[11] предложили определение оптимального периода между проверками для распределительной системы на основе готовности с учетом неопределенности времени проверки и времени восстановления. Джирутитижарун и др. [12] разработали сравнение методов моделирования показателей надежности энергосистемы и их распределение. Тивари и др. [13] предложили определение показателей надежности для распределительной системы с использованием метода выборки переходов состояний с учетом случайного отсутствия времени простоя. Тивари и др. [14] предложили методику оптимизации эксплуатационной готовности распределительных систем на основе инспекционного ремонта с использованием оптимизации на основе обучения. В работе [15] предложен метод на основе бутстрэппинга для оценки показателей надежности распределительной системы типа RBTS, не принимающий во внимание произвольное время простоя.

Волканавский и др. [16] предложили способ применения анализа дерева отказов для оценки надежности энергосистемы. Ли и др. [17] изучили влияние применения изолированных воздушных проводов на надежность и безопасность распределения. В работе Тивари и др. [18] получен способ повышения надежности распределительной системы с помощью оптимизации на основе обучения с учетом показателей, относящихся к потребителям и энергии. В работе Тивари и др. [19] получен самоприспосабливающийся многопопуляционный метод оптимизации резерва реактивной мощности на основе алгоритма Джая с учетом ограничений по пределу стабильности напряжения. Авторами [20] разработана эффективная методика на основе бутстрэппинга по оценке показателей надежности распределительной системы, пренебрегающая случайной продолжительностью перерывов. В работе [21] проведено обсуждение влияния изолированных воздушных проводов на надежность и безопасность распределения. Сарантакос и др. [22] представили метод учета состояния компонентов и надежности подстанции при реконфигурации распределительной системы. Батту и др. [23] обсудили метод планирования распределительной системы с учетом надежности с использованием моделирования по методу Монте-Карло.

Тивари и др. [24] обсудили методику оценки надежности радиальной системы распределения электроэнергии. Успенский и др. [25] разработали метод оценки надежности цифровой системы релейной защиты. В работе [26] была создана модель разделения графика нагрузки на пики и впадины и модель реагирования спроса, соответствующая каждому периоду, на основе характеристик пиков и впадин графика нагрузки. В работе [27] обсуждается вероятностный метод оценки влияния распространения электромобилей на показатели надежности системы электроснабжения. В работе [28] предложен единый метод моделирования производительности и надежности на основе Байесовых сетей. В работе [29] обсуждается структура для динамического прогнозиро-

вания слабых мест в системах передачи электроэнергии на основе несбалансированных данных. Фам и др. [30] предложили метод оценки надежности агрегированной аккумуляторной системы хранения энергии в микросетях в условиях динамической эксплуатации. Мин и др. [31] предложили схему исследования для всесторонней оценки новой политики по использованию возобновляемой энергии в системе электроснабжения в Южной Корее с последовательным использованием трех имитационных моделей.

Дин и др. [32] представили методику оценки надежности реструктуризированной энергосистемы с двусторонней торговлей. О и др. [33] предложили новую методику вероятностной оценки надежности энергосистемы с использованием моделирования по методу Монте-Карло для случая многообъектной системы хранения энергии, установленной на ветряных электростанциях. Шрестха и др. [34] предложили разработку системы оценки операционного соответствия для оперативного планирования магистральных электроэнергетических систем. Гаутам и др. [35] предложили разработку и интеграцию моделей кратковременных событий при оценке надежности активной распределительной системы. Адинольфи и др. [36] предложили многоцелевое оптимальное проектирование фотоэлектрических синхронных повышающих преобразователей с оценкой эффективности, надежности и экономичности. Тивари и др. [37] рассмотрели методологию оценки клиентоориентированных показателей и надежности сложносвязанной системы распределения электроэнергии.

Оценка различных показателей надежности важна для правильной работы распределительной системы. В настоящей работе представлено подробное исследование различных важных показателей надежности. Получены показатели надежности каждой распределительной системы и точки нагрузки. В работе также приведены значения трех основных и трех клиентоориентированных показателей надежности.

2. Оценка надежности последовательной системы

С физической точки зрения конфигурация системы будет представлять собой последовательную сеть надежности. При этом система выходит из строя даже при отказе одного компонента, и сохраняет работоспособность, если все компоненты сохраняют работоспособность.

Система имеет постоянную интенсивность отказов, поэтому надежность системы с постоянной интенсивностью отказов оценивается с помощью следующего соотношения

$$R(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

где $R(t)$ – надежность каждой распределительной секции, λ – интенсивность отказов, 1/год, а t – период времени, который принимается за один год.

Если принять надежность каждого компонента как $r_1, r_2, \dots, r_n$, то надежность последовательной системы (R_s) определяется как

$$R_s = \prod r_i \quad (2)$$

где r_i – надежность компонентов $i = 1, \dots, n$.

3. Оценка основных показателей надежности последовательной системы

При рассмотрении вопроса надежности последовательных систем тремя основными параметрами надежности являются средняя интенсивность отказов λ_s , среднее общее время восстановления в год U_s и среднее время восстановления r_s , о которых говорится ниже

$$\lambda_s = \sum \lambda_i \quad (3)$$

$$U_s = \sum (\lambda_i r_i), \quad (4)$$

$$r_s = (\sum \lambda_i r_i) / (\sum \lambda_i), \quad (5)$$

где λ_i – интенсивность отказов i -го компонента, 1/год;
 r_i – среднее время восстановления i -го компонента, ч.

4. Оценка клиентоориентированных показателей последовательной системы

Клиентоориентированные показатели, связанные с исследованием надежности – это индекс средней частоты прерываний электроснабжения, индекс средней длительности прерываний электроснабжения и индекс средней длительности прерывания электроснабжения одного потребителя, которые рассмотрены ниже.

Индекс средней частоты прерываний электроснабжения (System average interruption frequency index, SAIFI)

$$SAIFI = \frac{\text{общее число прерываний электроснабжения потребителя}}{\text{общее число обслуживаемых потребителей}}. \quad (6)$$

Индекс средней длительности прерываний электроснабжения (System average interruption duration index, SAIDI)

$$SAIDI = \frac{\text{сумма продолжительностей прерывания электроснабжения потребителя}}{\text{общее число потребителей}}. \quad (7)$$

Индекс средней длительности прерывания электроснабжения одного потребителя (Customer average interruption duration index, CAIDI)

$$CAIDI = \frac{\text{сумма продолжительностей прерывания электроснабжения потребителя}}{\text{общее число прерываний электроснабжения потребителя}}. \quad (8)$$

5. Результаты и обсуждение

Восьмиузловая радиальная распределительная система состоит из семи распределительных сегментов и 7 точек нагрузки от LP-2 до LP-8 (рис. 1) [4].

В табл. 1 [4] приведены исходные данные для радиальной распределительной системы. В табл. 1 приведена частота отказов в год и время восстановления в часах для каждой распределительной секции от 1 до 7 радиальной распределительной системы. В табл. 2 приведено число клиентов в каждой точке нагрузки от LP-2 до LP-8.

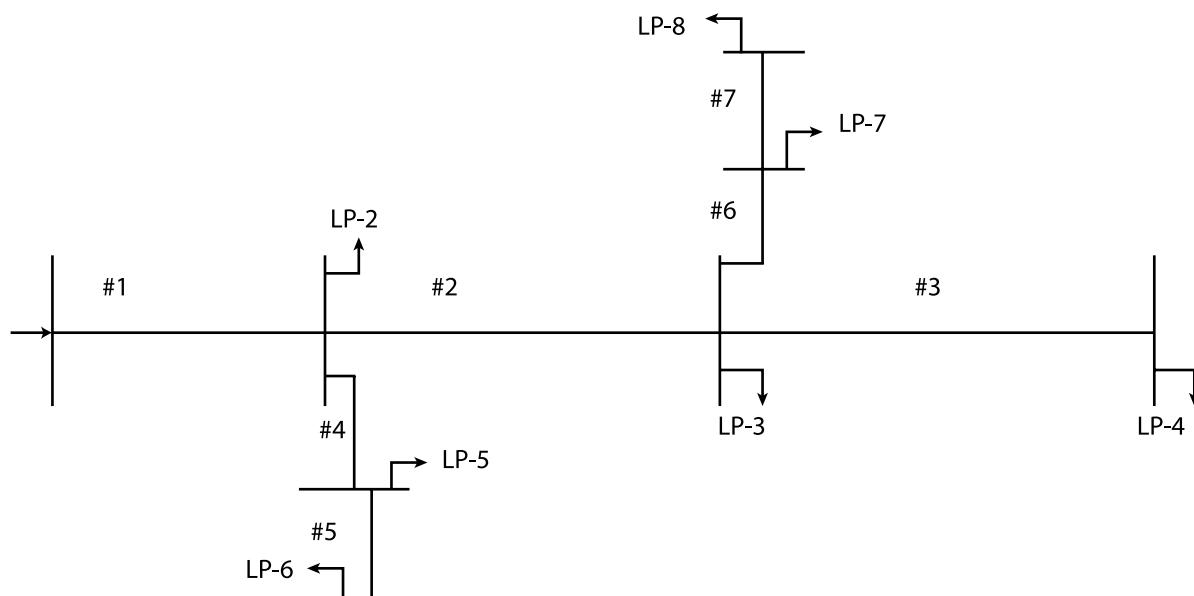


Рис. 1. Восьмиузловая распределительная система

Табл. 1. Исходные данные для радиальной
распределительной системы [4]

Распределительная секция	1	2	3	4	5	6	7
λ , отказов/год	0,4	0,2	0,3	0,5	0,2	0,1	0,1
r , среднее время восстановления, часы	10	9	12	20	15	8	12

Табл. 2. Исходные данные для точек нагрузки

Точка нагрузки	2	3	4	5	6	7	8
Число клиентов	1000	800	600	800	500	400	300

Оценка надежности по каждой распределительной секции представлена в табл. 3. Надежность по каждой распределительной секции оценивается с помощью уравнения (1). На рис. 2 показана величина надежности для различных распределительных секций.

Табл. 3. Оценка надежности по каждой распределительной секции

Распределительная секция	Надежность
1	0,6703
2	0,8187
3	0,7408
4	0,6065
5	0,8187
6	0,9048
7	0,9048

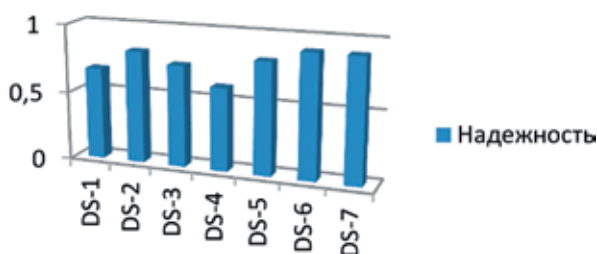


Рис. 2. Значения надежности для различных распределительных секций

В табл. 4 приведены расчетные значения надежности в каждой точке нагрузки радиальной распределительной системы. Надежность в каждой точке нагрузки получена с помощью уравнения (2). На рис. 3 показаны значения надежности в различных точках нагрузки распределительной системы.

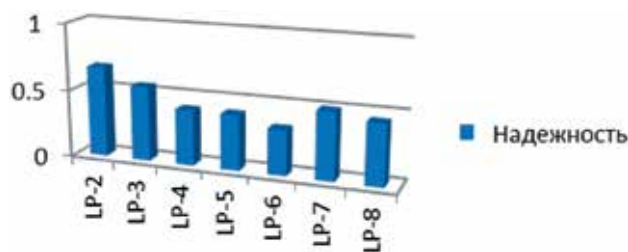


Рис. 3. Значения надежности для различных точек нагрузки

Табл. 4. Оценка надежности в каждой точке нагрузки

Точка нагрузки	Надежность
2	0,6703
3	0,5488
4	0,4065
5	0,4065
6	0,3328
7	0,4965
8	0,4492

Основные показатели надежности в каждой точке нагрузки, т.е. средняя интенсивность отказов, среднее время отказа и среднее общее время отказа в год, представлены в табл. 5.

Получены следующие значения клиентоориентированных показателей радиальной распределительной системы: индекс средней частоты прерываний электроснабжения (SAIFI) – 0,7295, индекс средней длительности прерываний электроснабжения (SAIDI) – 8,8545 и индекс средней длительности прерывания электроснабжения одного потребителя (CAIDI) – 12,1371.

Табл. 5. Оценки основных показателей надежности в каждой точке нагрузки

Точка нагрузки	2	3	4	5	6	7	8
Средняя интенсивность отказов, 1/год	0,4	0,6	0,9	0,9	1,1	0,7	0,8
Средняя длительность отказа, ч	10	9,67	10,4	15,56	15,45	9,42	9,75
Средняя длительность отказа в год, ч	4	5,8	9,4	14	17	6,6	7,8

6. Заключение

Оценка надежности и других связанных с ней показателей крайне важна для системы распределения электроэнергии. В данной работе рассмотрены различные параметры надежности применительно к радиальной распределительной системе. Получены показатели надежности для каждой распределительной секции радиальной распределительной системы. Для каждой точки нагрузки рассматриваемой распределительной системы оценено значение надежности. Для рассматриваемых точек нагрузки также получены три основных параметра надежности: средняя интенсивность отказов, среднее время отказа и среднее общее время отказа в год. Для радиальной распределительной системы также оценены важные клиентоориентированные показатели: индекс средней частоты прерываний электроснабжения, индекс средней длительности прерываний электроснабжения и индекс средней длительности прерывания электроснабжения одного потребителя.

Библиографический список

1. Singh C. Markov cut-set approach for the reliability evaluation of transmission and distribution systems // IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. 1981. Vol. 100. Pp. 2719-2725.
2. Billinton R. Composite system reliability evaluation // IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. 1969. Vol. 88. Pp. 276-281.
3. Wojczynski E., Billinton R. Effects of distribution system reliability index distributions upon interruption cost/reliability worth estimates // IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. 1985. Vol. 11. Pp. 3229-3235.
4. Verma A.K., Srividya A., Kumar H.M.R. A framework using uncertainties in the composite power system reliability evaluation // Electric Power Components and Systems. 2002. Vol. 30. Pp. 679-691.
5. Zheng Z., Cui L., Hawkes A.G. A study on a single-unit Markov repairable system with repair time omission // IEEE Trans. on Reliability. 2006. Vol. 55. Pp. 182-188.
6. Jirutitijaroen P., Singh C. Comparison of simulation methods for power system reliability indexes and their distributions // IEEE Trans. on Power Systems. 2008. Vol. 23. Pp. 486-493.
7. Dzobe O., Gaunt C.T., Herman R. Investigating the use of probability distribution functions in reliability-worth analysis of electric power systems // Int. J. of Electrical Power and Energy Systems. 2012. Vol. 37. Pp. 110-116.
8. Bae I.S., Kim J.O. Reliability evaluation of customers in a microgrid // IEEE Trans. on Power Systems. 2008. Vol. 23. Pp. 1416-1422.
9. Billinton R., Wang P. Reliability-network-equivalent approach to distribution-system-reliability evaluation // IEEE Proc. generation, transmission and distribution. 1998. Vol. 145. Pp. 149-153.
10. Arya L.D., Choube S.C., Arya R. et al. Evaluation of Reliability indices accounting omission of random repair time for distribution systems using Monte Carlo simulation // Int. J. of Electrical Power and Energy System (ELSEVIER). 2012. Vol. 42. Pp. 533-541.
11. Tiwary A., Arya R., Choube S.C. et al. Determination of Optimum period between Inspections for Distribution system based on Availability Accounting Uncertainties in Inspection Time and Repair Time // Journal of The Institution of Engineers (India): series B (Springer). 2012. Vol. 93. Pp. 67-72.
12. Jirutitijaroen P., Singh C. Comparison of simulation methods for power system reliability indexes and their distribution // IEEE Trans Power Syst. 2008. Vol. 23. Pp. 486-493.
13. Tiwary A., Arya R., Choube S.C. et al. Determination of reliability indices for distribution system using a state transition sampling technique accounting random down time omission // Journal of The Institution of Engineers (India): series B (Springer). 2013. Vol. 94. Pp. 71-83.
14. Tiwary A., Arya L.D., Arya R. et al. Inspection repair based availability optimization of distribution systems using Teaching Learning based Optimization // Journal of The Institution of Engineers (India): series B (Springer). 2016. Vol. 97. Pp. 355-365.
15. Tiwary A., Arya R., Arya L.D. et al. Bootstrapping based technique for evaluating reliability indices of RBTS distribution system neglecting random down time // The IUP Journal of Electrical and Electronics Engineering. 2017. Vol. X(2). Pp. 48-57.
16. Volkanavski, Cepin M., Mavko B. Application of fault tree analysis for assessment of the power system reliability // ReliabEngSyst Safety. 2009. Vol. 94. Pp. 1116-1127.
17. BM Li, CT Su, CL Shen. The impact of covered overhead conductors on distribution reliability and safety // Int. J. Electr. Power Energy Syst. 2010. Vol. 32. Pp. 281-289.
18. Tiwary A. Reliability enhancement of distribution system using Teaching Learning based optimization considering customer and energy based indices // International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering. 2017. Vol. 3. Pp. 58-62.
19. Tiwary A. Self-Adaptive Multi-Population Jaya Algorithm based Reactive Power Reserve Optimization Considering Voltage Stability Margin Constraints // International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering. 2018. Vol. 4. Pp. 341-345.
20. Arya R., Tiwary A., Choube S.C. et al. A smooth bootstrapping based technique for evaluating distribution system reliability indices neglecting random interruption duration // Int. J. of Electrical Power and Energy System (ELSEVIER). 2013. Vol. 51. Pp. 307-310.
21. BinLi M., TzongSu C., LungShen C. The impact of covered overhead conductors on distribution reliability and safety // Int. J. of Electrical Power and Energy System (ELSEVIER). 2010. Vol. 32. Pp. 281-289.
22. Sarantakos I., Greenwood D.M., Yi J., Blake S.R., Taylor P.C. A method to include component condition and substation reliability into distribution system reconfiguration // Int. J. of Electrical Power and Energy System (ELSEVIER). 2019. Vol. 109. Pp. 122-138.
23. Battu N.R., Abhyankar A.R., Senroy N. Reliability Compliant Distribution System Planning Using Monte Carlo Simulation // Electric power components and systems. 2019. Vol. 47. Pp. 985-997.
24. Tiwary A. Reliability evaluation of radial distribution system – A case study // Int. J. of Reliability: Theory and Applications. 2019. Vol. 14. Pp. 9-13.
25. Uspensky M. Reliability assessment of the digital relay protection system // Int. J. of Reliability: Theory and Applications. 2019. Vol. 14. Pp. 10-17.
26. Li N., Wang X., Zhu Z. et al. The reliability evaluation research of distribution system considering demand response / The 6th International Conference on Power and Energy Systems Engineering (CPESE 2019), Okinawa, Japan.
27. Anand M.P., Bagen B., Rajapakse A. Probabilistic reliability evaluation of distribution systems considering the spatial and temporal distribution of electric vehicles // Int.

J. of Electrical Power & Energy Systems. 2020. Vol. 117. ID: 105609.

28. Ren Yi, Cui B., Feng Q.A. et al. A reliability evaluation method for radial multi-microgrid systems considering distribution network transmission capacity // Computers & Industrial Engineering. 2020. Vol. 139. ID: 106145.

29. Sun C., Wang X., Zheng Y. et al. A framework for dynamic prediction of reliability weaknesses in power transmission systems based on imbalanced data // Int. J. of Electrical Power & Energy Systems. 2020. Vol. 117. ID: 105718.

30. Pham T.T., Kuo T.C., Bui D.M. Reliability evaluation of an aggregate battery energy storage system in microgrids under dynamic operation // Int. J. of Electrical Power & Energy Systems. 2020. Vol. 118. ID: 105786.

31. Min D., Ryu J.H., Choi D.G. Effects of the move towards renewables on the power system reliability and flexibility in South Korea // Energy Reports. 2020. Vol. 6. Pp. 406-417.

32. Ding Y., Wang P., Goel L. et al. Reliability assessment of restructured power systems using reliability network equivalent and pseudo-sequential simulation techniques // Electric Power Systems Research. 2007. Vol. 77. Pp. 1665-1671.

33. Oh U., Lee Y., Choi J. et al. Reliability evaluation of power system considering wind generators coordinated with multi-energy storage systems // IET Generation, Transmission & Distribution. 2019. Vol. 14(5). Pp. 786-796.

34. Shrestha T.K., Karki R., Piya P. Development of an operational adequacy evaluation framework for operational planning of bulk electric power systems // International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering. 2020. Vol. 27(5). P. 2040010.

35. Gautam P., Piya P., Karki R. Development and integration of momentary event models in active distribution system reliability assessment // IEEE Transactions on Power Systems. 2019. Vol. 35(4). Pp. 3236-3246.

36. Adinolfi G., Graditi G., Siano P., Piccolo A. Multiobjective optimal design of photovoltaic synchronous boost converters assessing efficiency, reliability, and cost savings. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2015. Vol. 11(5). Pp. 1038-1048.

37. Tiwary A. Customer orientated indices and reliability evaluation of meshed power distribution system // Int. J. of Reliability: Theory and Applications. 2020. Vol. 15. No. 1(56). Pp. 10-19.

References

1. Singh C. Markov cut-set approach for the reliability evaluation of transmission and distribution systems. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems* 1981;100:2719-2725.

2. Billinton R. Composite system reliability evaluation. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems* 1969;88:276-281.

3. Wojczynski E., Billinton R. Effects of distribution system reliability index distributions upon interruption cost/

reliability worth estimates. *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems* 1985;11:3229-3235.

4. Verma A.K., Srividya A., Kumar H.M.R. A framework using uncertainties in the composite power system reliability evaluation. *Electric Power Components and Systems* 2002;30:679-691.

5. Zheng Z., Cui L., Hawkes A.G. A study on a single-unit Markov repairable system with repair time omission. *IEEE Trans. on Reliability* 2006;55:182-188.

6. Jirutitijaroen P., Singh C. Comparison of simulation methods for power system reliability indexes and their distributions. *IEEE Trans. on Power Systems* 2008;23:486-493.

7. Dzobe O., Gaunt C.T., Herman R. Investigating the use of probability distribution functions in reliability-worth analysis of electric power systems. *Int. J. of Electrical Power and Energy Systems* 2012;37:110-116.

8. Bae I.S., Kim J.O. Reliability evaluation of customers in a microgrid. *IEEE Trans. on Power Systems* 2008;23:1416-1422.

9. Billinton R., Wang P. Reliability-network-equivalent approach to distribution-system-reliability evaluation. *IEEE Proc. generation, transmission and distribution* 1998;145:149-153.

10. Arya L.D., Choube S.C., Arya R. et al. Evaluation of Reliability indices accounting omission of random repair time for distribution systems using Monte Carlo simulation. *Int. J. of Electrical Power and Energy System (ELSEVIER)* 2012;42:533-541.

11. Tiwary A., Arya R., Choube S.C. et al. Determination of Optimum period between Inspections for Distribution system based on Availability Accounting Uncertainties in Inspection Time and Repair Time. *Journal of The Institution of Engineers (India): series B (Springer)* 2012;93:67-72.

12. Jirutitijaroen P., Singh C. Comparison of simulation methods for power system reliability indexes and their distribution. *IEEE Trans Power Syst.* 2008;23: 486-493.

13. Tiwary A., Arya R., Choube S.C. et al. Determination of reliability indices for distribution system using a state transition sampling technique accounting random down time omission. *Journal of The Institution of Engineers (India): series B (Springer)* 2013;94:71-83.

14. Tiwary A., Arya L.D., Arya R. et al. Inspection repair based availability optimization of distribution systems using Teaching Learning based Optimization. *Journal of The Institution of Engineers (India): series B (Springer)* 2016;97:355-365.

15. Tiwary A., Arya R., Arya L.D. et al. Bootstrapping based technique for evaluating reliability indices of RBTS distribution system neglecting random down time. *The IUP Journal of Electrical and Electronics Engineering* 2017;X(2):48-57.

16. Volkanavski, Cepin M., Mavko B. Application of fault tree analysis for assessment of the power system reliability. *ReliabEngSyst Safety* 2009;94:1116-1127.

17. BM Li, CT Su, CL Shen. The impact of covered overhead conductors on distribution reliability and safety. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2010;32:281-289.

18. Tiwary A. Reliability enhancement of distribution system using Teaching Learning based optimization considering customer and energy based indices. *International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering* 2017;3:58-62.

19. Tiwary A. Self-Adaptive Multi-Population Jaya Algorithm based Reactive Power Reserve Optimization Considering Voltage Stability Margin Constraints. *International Journal on Future Revolution in Computer Science & Communication Engineering* 2018;4:341-345.

20. Arya R., Tiwary A., Choube S.C. et al. A smooth bootstrapping based technique for evaluating distribution system reliability indices neglecting random interruption duration. *Int. J. of Electrical Power and Energy System (ELSEVIER)* 2013;51:307-310.

21. BinLi M., TzongSu C., LungShen C. The impact of covered overhead conductors on distribution reliability and safety. *Int. J. of Electrical Power and Energy System (ELSEVIER)* 2010;32:281-289.

22. Sarantakos I., Greenwood D.M., Yi J., Blake S.R., Taylor P.C. A method to include component condition and substation reliability into distribution system reconfiguration. *Int. J. of Electrical Power and Energy System (ELSEVIER)* 2019;109:122-138.

23. Battu N.R., Abhyankar A.R., Senroy N. Reliability Compliant Distribution System Planning Using Monte Carlo Simulation. *Electric power components and systems* 2019;47:985-997.

24. Tiwary A. Reliability evaluation of radial distribution system – A case study. *Int. J. of Reliability: Theory and Applications* 2019;14:9-13.

25. Uspensky M. Reliability assessment of the digital relay protection system. *Int. J. of Reliability: Theory and Applications* 2019;14:10-17.

26. Li N., Wang X., Zhu Z. et al. The reliability evaluation research of distribution system considering demand response. In: The 6th International Conference on Power and Energy Systems Engineering (CPESE 2019), Okinawa, Japan.

27. Anand M.P., Bagen B., Rajapakse A. Probabilistic reliability evaluation of distribution systems considering the spatial and temporal distribution of electric vehicles. *Int. J. of Electrical Power & Energy Systems* 2020;117:105609.

28. Ren Yi, Cui B., Feng Q.A. et al. A reliability evaluation method for radial multi-microgrid systems considering distribution network transmission capacity. *Computers & Industrial Engineering* 2020;139:106145.

29. Sun C., Wang X., Zheng Y. et al. A framework for dynamic prediction of reliability weaknesses in power transmission systems based on imbalanced data. *Int. J. of Electrical Power & Energy Systems* 2020;117:105718.

30. Pham T.T., Kuo T.C., Bui D.M. Reliability evaluation of an aggregate battery energy storage system in microgrids under dynamic operation. *Int. J. of Electrical Power & Energy Systems* 2020;118:105786.

31. Min D., Ryu J.H., Choi D.G. Effects of the move towards renewables on the power system reliability and flexibility in South Korea. *Energy Reports* 2020;6:406-417.

32. Ding Y., Wang P., Goel L. et al. Reliability assessment of restructured power systems using reliability network equivalent and pseudo-sequential simulation techniques. *Electric Power Systems Research* 2007;77:1665-1671.

33. Oh U., Lee Y., Choi J. et al. Reliability evaluation of power system considering wind generators coordinated with multi-energy storage systems. *IET Generation, Transmission & Distribution* 2019;14(5):786-796.

34. Shrestha T.K., Karki R., Piya P. Development of an operational adequacy evaluation framework for operational planning of bulk electric power systems. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering* 2020;27(5):2040010.

35. Gautam P., Piya P., Karki R. Development and integration of momentary event models in active distribution system reliability assessment. *IEEE Transactions on Power Systems* 2019;35(4):3236-3246.

36. Adinolfi G., Graditi G., Siano P., Piccolo A. Multiobjective optimal design of photovoltaic synchronous boost converters assessing efficiency, reliability, and cost savings. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 2015;11(5):1038-1048.

37. Tiwary A. Customer orientated indices and reliability evaluation of meshed power distribution system. *Int. J. of Reliability: Theory and Applications* 2020;1(56):10-19.

Сведения об авторах

Адितья Тивари – кафедра противопожарной техники и безопасности, Академия IPS, Институт технических и естественных наук, Раджендра Нагар, Индаур (штат Мадхья-Прадеш), Индия, e-mail: raditya2002@gmail.com

Свати Тивари – предприниматель, Виджай Нагар, Индаур, Индия.

About the authors

Aditya Tiwary, Dept. of Fire Technology & Safety Engineering, IPS Academy, Institute of Engineering and science, Rajendra Nagar, Indore (M.P), India, e-mail: raditya2002@gmail.com.

Swati Tiwary, Entrepreneur, Vijay Nagar, Indore, India.

Вклад авторов в статью

Адитья Тивари выполнил постановку задачи и оценку основных показателей надёжности, включая клиентоориентированные показатели системы электроснабжения.

Свати Тивари выполнил обзор библиографических источников, участвовал в постановке задачи и анализе исходных данных.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Подход к обнаружению аномалий в самоподобном сетевом трафике

An approach to detecting anomalies in a self-similar network traffic

Веселова В.А.¹, Коломойцев В.С.^{1*}

Veselova V.A.¹, Kolomoitsey V.S.^{1*}

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

¹Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russian Federation

*Dekoros@guap.ru



Веселова В.А.



Коломойцев В.С.

Резюме. Цель. Воздействия кибератак приводят к выводу из эксплуатации элементов сети, хищению информации и другим неправомерным действиям. Зачастую кибератаки сопровождаются нехарактерной активностью трафика и появлением в нем аномалий. Целью статьи является разработка подхода к выявлению аномалий в сетевом трафике за счет определения степени самоподобия трафика с использованием фрактального анализа и статистических методов. **Методы.** В статье применяются методы математической статистики, математического анализа, фрактального анализа. **Результаты.** Предложен подход к обнаружению аномалий в сетевом трафике путем оценки свойства самоподобия и использования статистических методов для повышения точности определения кибератак. На первом этапе вычисляется показатель Херста для эталонного трафика. На втором этапе реальный трафик разбивается на оптимальные временные интервалы, для каждого интервала считается показатель Херста. Если выявленное значение показателя Херста отличается от значения, полученного для эталонного трафика, принимается решение о наличии аномалий. На заключительном этапе применяется статистический анализ для определения точного места аномалии. Проведен анализ фрактальных и статистических методов, в результате которого были определены более эффективные методы для использования в предлагаемом подходе. Для фрактального анализа предложен метод DFA, для статистического – ARFIMA. **Заключение.** Предлагаемый подход позволяет обнаружить кибератаки в реальном или близком к реальному масштабе времени.

Abstract. Aim. The effects of cyber attacks cause failures of network elements, theft of information and other unlawful actions. Cyber attacks are often accompanied by untypical traffic activity and anomalies. The paper aims to develop an approach to detecting anomalies in network traffic by identifying the degree of self-similarity of the traffic using fractal analysis and statistical methods. **Methods.** The paper uses methods of mathematical statistics, mathematical analysis, fractal analysis. **Results.** The paper suggests an approach to identifying anomalies in network traffic by evaluating self-similarity and using statistical methods for improving the accuracy of cyber attack detection. At the first stage, the Hurst exponent is calculated for the reference traffic. At the second stage, actual traffic is divided into optimal time intervals; for each interval, the Hurst exponent is calculated. If the identified value of the Hurst exponent differs from the one obtained for the reference traffic, it is decided that there is an anomaly. At the final stage, statistical analysis is used in order to precisely localise the anomaly. The authors analysed fractal and statistical methods that resulted in the identification of more efficient methods to be used as part of the proposed approach. For fractal analysis, the DFA method was proposed, while for statistical analysis, the ARFIMA method was proposed. **Conclusion.** The suggested approach allows identifying cyber attacks in real time or near-real time.

Ключевые слова: временной ряд, фрактальный анализ, статистический анализ, показатель Херста, аномалии, сетевой трафик.

Keywords: time series, fractal analysis, statistical analysis, Hurst exponent, anomalies, network traffic.

Для цитирования: Веселова В.А., Коломойцев В.С. Подход к обнаружению аномалий в самоподобном сетевом трафике // Надежность. 2023. №2. С. 57-63. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-2-57-63>

For citation: Veselova V.A., Kolomoitsey V.S. An approach to detecting anomalies in a self-similar network traffic. Dependability 2023;2:57-63. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-2-57-63>

Поступила: 09.02.2023 / **После доработки:** 26.04.2023 / **К печати:** 15.06.2023

Received on: 09.02.2023 / **Revised on:** 26.04.2023 / **For printing:** 15.06.2023

Введение

Использование повсеместно компьютерных сетей сопровождается генерацией большого потока сетевого трафика. Злоумышленники с целью сбора и хищения информации, вывода инфраструктуры из строя применяют кибератаки, однако их атаки могут быть не замечены в общем потоке трафика и привести к инцидентам в компьютерных сетях. Поэтому важной задачей является быстрое определение наличия аномалий в сетевом трафике и реагирования на них.

В исследованиях показано, что объединенный из нескольких источников трафик становится сильно автокоррелированным с долговременной зависимостью [1-6]. Таким образом, сетевой трафик способен сохранять свой характер при изменении масштаба времени. Поэтому его принято рассматривать, как самоподобный нестационарный процесс. Методы анализа самоподобных процессов основываются на фрактальном анализе [4-7]. В нескольких научных работах отмечается эффективное применение фрактального анализа для обнаружения аномалий сетевого трафика как общего характера, так и для обнаружения DDoS-атак [1-13].

Коэффициент Херста (H) является важнейшим параметром, характеризующим степень самоподобия. При $0,5 < H \leq 1,0$ процесс является строго самоподобным, при $H = 0,5$ – случайный процесс, при $0 \leq H < 0,5$ процесс не является самоподобным [1].

Данная работа посвящена разработке методики выявления аномалий в сетевом трафике за счет определения степени самоподобия трафика с использованием фрактального анализа и статистических методов.

Методы фрактального анализа

Для определения самоподобия трафика и значения показателя Херста используются R/S анализ и метод детрендрованного флуктуационного анализа (Detrended Fluctuation Analysis, DFA) [2, 6, 7].

R/S анализ. Показатель Херста (H) определяется в терминах асимптотического поведения масштабированного диапазона, как функции отрезка времени временного ряда, следующим образом: $R/S = C \cdot n^H$. В указанной формуле R – размах накопленных отклонений n значений от среднего значения ряда, S – среднеквадратическое отклонение ряда наблюдений, n – число промежутков времени, C – заданная константа, положительное число (автор показателя Херст эмпирически рассчитал эту константу для сравнительно краткосрочных временных рядов природных явлений как 0,5) [7].

Этот метод может быть легко применен на практике. Обладая достаточным уровнем надежности, в то же время метод является простым в применении. Однако данный метод крайне чувствителен к длине ряда [6, 7].

Метод DFA. Метод детрендрованного флуктуационного анализа в настоящее время является основным методом определения самоподобия для нестационар-

ных временных рядов. В исследованиях показано, что метод способен оценивать H с высокой точностью и относительной простотой [8, 9, 10, 11]. Алгоритм DFA заключается в вычислении флуктуационной функ-

ции: $F(\delta) = \sqrt{\frac{1}{\delta} \sum_{t=1}^{\delta} (y(t) - Y_m(t))^2}$, где $Y_m(t)$ – локальный m -полиномиальный тренд в пределах данного сегмента, $y(t)$ – кумулятивный ряд, разбитый на N сегментов длиной δ . Для самоподобных процессов имеет место степенная зависимость: $F(\delta) \sim \delta^H$. H определяется, как коэффициент при независимой переменной в уравнении линейной регрессии: $\ln F(\delta) = H \cdot \ln \delta + b$, где b – свободный член.

При проведении сравнительных исследований эффективности работы рассмотренных методов оценивания H показано, что для стационарных временных рядов пригодны оба метода (R/S анализ и метод DFA) [7]. R/S анализ для временных рядов малой длины дает большую погрешность в результатах, чем метод DFA [7]. Также R/S анализ не применим для нестационарных рядов, так как дает большую погрешность, достигающую 20-30% [7]. Поэтому для нахождения показателя H в нестационарных процессах, к которым относиться и сетевой трафик, предполагается использовать метод DFA.

Статистические методы анализа сетевого трафика

Исследуем статистические методы анализа для прогнозирования ожидаемого значения сетевого трафика.

МА. Скользящее среднее (англ. moving average, МА) – общее название для семейства функций, значения которых в каждой точке определения равны некоторому среднему значению исходной функции за предыдущий период. Скользящее среднее (МА) можно рассчитать по

формуле: $MA = \left(\sum_{i=0}^n p_i \right) / N$, где p_i – значения в периоде n , N – количество значений в периоде n .

На рис. 1а представлены результаты вычисления скользящего среднего для временного ряда. Метод МА отличается повышенной чувствительностью к выбросам данных. Кратковременный, но очень сильный всплеск приводит к достаточному длительному и существенному изменению амплитуды скользящего среднего. Метод МА способен прогнозировать поведение трафика только на ближайшие периоды времени [13, 14].

WMA. Взвешенное скользящее среднее (англ. weighted moving average, WMA) – скользящее среднее, при вычислении которого вес каждого члена исходной функции, начиная с меньшего, равен соответствующему члену арифметической прогрессии. Вычислить взвешенное скользящее среднее можно по следующей формуле:

$$WMA = \sum_{i=0}^n w_i \cdot p_i / \sum_{i=0}^n w_i,$$

где p_i – значения в периоде n , w_i – вес значения.

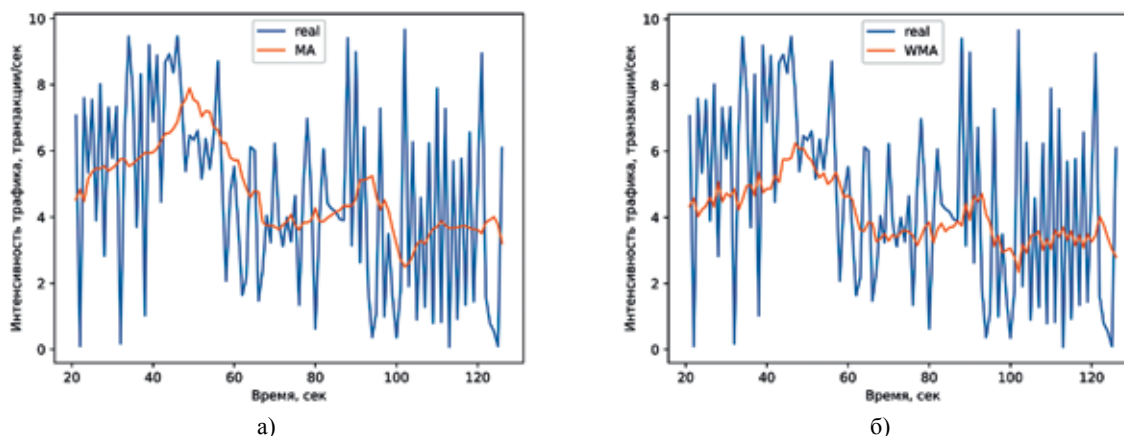


Рис. 1. Результаты применения статистических методов анализа: (а) – метод МА; (б) – метод WMA

На рис. 1б представлены результаты вычисления взвешенного скользящего среднего для временного ряда.

Метод WMA позволяет учитывать временный контекст. Чем раньше произошло событие, тем меньше его влияние на прогнозируемое событие. Метод WMA более чувствителен к колебаниям (см. рис. 1а и рис. 1б). Показано, что линия МА имеет более сглаженный характер, чем WMA.

ARIMA. ARIMA (англ. autoregressive integrated moving average) – интегрированная модель авторегрессии скользящего среднего – модель и методология анализа временных рядов [15]. ARIMA, представляет собой алгоритм прогнозирования, основанный на концепции, согласно которой данные предыдущих значений временного ряда могут использоваться только для прогнозирования будущих значений [12]. AR-часть ARIMA указывает, что изменяющаяся переменная, представляющая интерес, регрессирует по своим собственным предшествующим значениям. MA-часть указывает, что ошибка регрессии на самом деле представляет собой линейную комбинацию членов ошибки, значения которых произошли одновременно и в разное время в прошлом. I-часть (для «интегрированного») указывает, что значения данных были заменены разницей между их значениями и предыдущими значениями. Цель каждой из этих функций сделать так, чтобы модель как можно лучше соответствовала данным.

Модель ARIMA (p, d, q) для нестационарного временного ряда X_t имеет вид: $\Delta^d X_t = c + \sum_{i=1}^p a_i \Delta^d X_{t-i} + \sum_{j=1}^q b_j \varepsilon_{t-j} + \varepsilon_t$, где ε_t – стационарный временной ряд, c, a_i, b_j – параметры модели, Δ^d – оператор разности временного ряда порядка d .

На рис. 2 представлены результаты вычисления ARIMA для временного ряда. Из графика видно, что при помощи ARIMA можно спрогнозировать ожидаемые значения временного ряда с высокой степенью точности [16, 17].

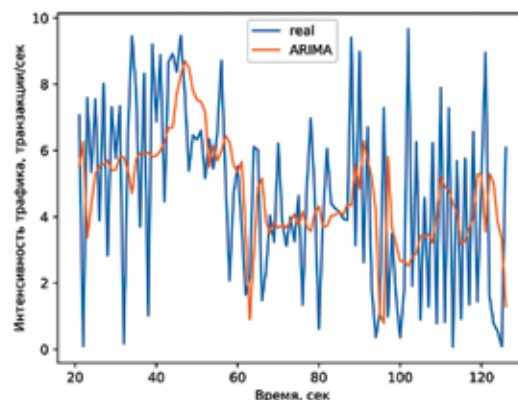


Рис. 2. Результаты применения ARIMA

ARFIMA. ARFIMA (p, d, q) – процесс авторегрессии дробного интегрированного скользящего среднего. Основное преимущество модели ARFIMA является то, что данный подход лучше работает при оценке феномена длительной памяти и производится оценка дробного параметра с использованием различных методов [15].

Модель ARFIMA (p, d, q) имеет тот же вид, что ARIMA. Единственным отличием между двумя моделями заключается в том, что d может принимать дробные значения в модели ARFIMA, в то время как в ARIMA модели может быть только целым [18]. Исследования показали, что степень разности связана с показателем

Табл. 1. Оценка статистических методов

Метод	МА	WMA	ARIMA	ARFIMA
Сложность	Низкая	Низкая	Средняя	Средняя
Точность	Низкая	Низкая	Высокая	Высокая
Применение к нестационарным моделям	–	–	+	+
Возможность использования метрик фрактального анализа	–	–	–	+

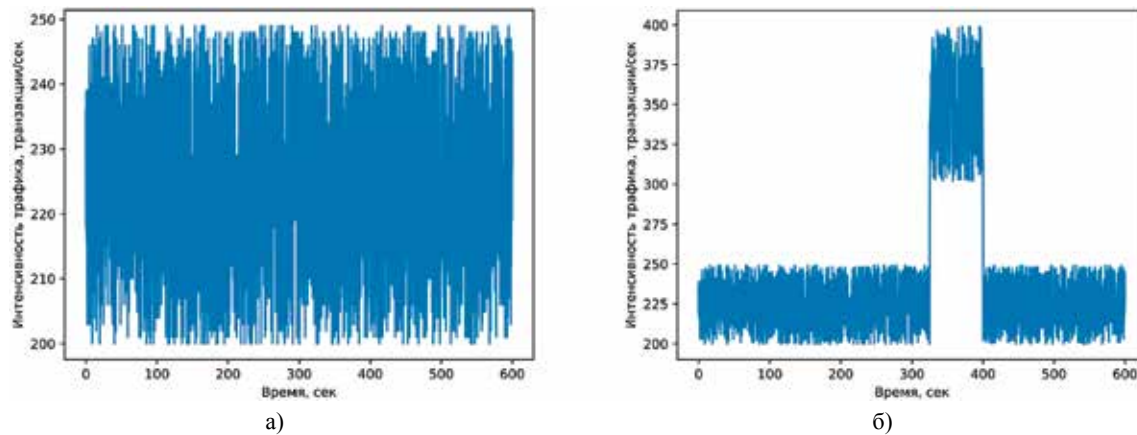


Рис. 3. Интенсивность трафика: а) – эталонного; б) – с DDoS-атакой

Херста отношением: $d=H-0,5$. Таким образом, предполагается, что модель ARFIMA способна спрогнозировать более точное ожидаемое значение сетевого трафика, чем при использовании модели ARIMA.

В табл. 1 представлена оценка сложности реализации и точность применения статистических методов для поиска аномалий во временных рядах. Оценка сложности и точности методов проводилась на основе полученных результатов прогнозирования временных рядов различными статистическими методами. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что прогнозирование с помощью ARIMA дает более точные результаты, чем MA и WMA, однако ARIMA и ARFIMA имеют более сложную математическую модель.

Описание метода детектирования аномалий

Исследовав существующие методы фрактального и статистического анализа, с помощью которых можно определить характеристики трафика, сигнализирующие об изменениях в его структуре, предложим следующий подход детектирования аномалий сетевого трафика, основанный на фрактальном и статистическом анализе.

На первом этапе (вспомогательном) анализируется самоподобные свойства эталонного трафика. В эталонном трафике отсутствуют аномалии. В результате этого анализа определяется значение показателя Херста, соответствующее эталонному трафику.

На втором этапе (основном) анализируется самоподобные свойства реального трафика, для которого могут быть характерны аномалии, вызванные воздействием кибератак. При этом используются те же методы определения значения показателя Херста, что и для эталонного трафика. Если полученное значение показателя Херста отличается от значения, полученного для эталонного трафика, принимается решение о наличии аномалий в реальном трафике, которые могут быть вызваны воздействием кибератак. Кроме того, на этом же этапе определяется минимальный размер группы пакетов, достаточный для точной оценки показателя самоподобия. Чем меньше размер группы, тем меньше времени

потребуется для детектирования кибератаки. Однако при слишком маленьких размерах пакетов может ухудшаться точность детектирования аномалии.

Значение показателя Херста указывает на наличие или отсутствие самоподобия трафика. Отклонение показателя Херста реального трафика от эталонного может свидетельствовать об изменении фактуры трафика, которая может быть вызвана кибератакой в рассматриваемом диапазоне сетевого трафика. Для точного определения времени возникновения аномалии в рассматриваемом диапазоне, предлагается использовать статистические методы.

На третьем этапе на основе методов математической статистики осуществляется определение места аномалии и классификация кибератак с целью реализации мер защиты.

На рис. 3а представлена интенсивность эталонного трафика, измеряемая в количестве транзакций в секунду. Интенсивность имеет равномерный характер. На рис. 3б представлена интенсивность трафика с DDoS-атакой в промежутке времени с 325 до 400 секунд – в данный интервал времени наблюдается резкое увеличение интенсивности трафика.

Для эталонного и трафика с аномалией был рассчитан показатель Херста с помощью метода DFA. Для эталонного трафика была проведена оценка показателя самоподобия всего трафика без деления на группы ($H = 0,99$), трафик с аномалией был разделен на группы по 120 секунд, для каждой группы была проведена оценка показателя самоподобия.

Сравнение показателя Херста эталонного и реального трафиков проводится с помощью средней абсолютной ошибки (MAPE), по следующей формуле:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{|Z(t) - \hat{Z}(t)|}{Z(t)} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где $Z(t)$ – фактическое значение временного ряда, а $\hat{Z}(t)$ – прогнозируемое, N – количество отчетов.

Если значение MAPE превышает 5%, предполагается, что исследуемый временной отрезок реального трафика имеет аномалию.

На рис. 4 представлен график с полученными результатами показателя Херста для эталонного трафика и трафика с аномалией. Видно, что в интервал времени с 240 по 480 секунд показатель Херста трафика с аномалией отличается более чем на 5% от показателя Херста эталонного трафика, что свидетельствует об изменении самоподобной структуры трафика, что вызвано предполагаемой атакой.

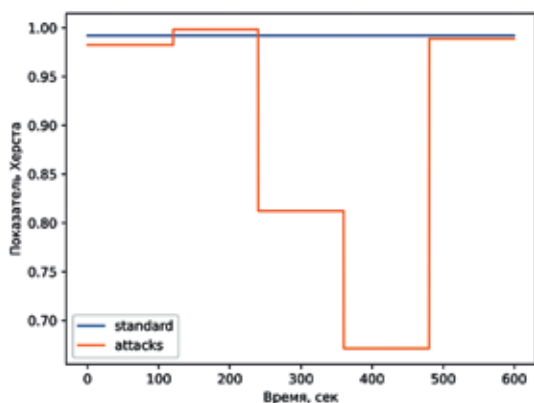


Рис. 4. Показатель Херста эталонного трафика и трафика с аномалией.

Из рассмотренных статистических методов для заключительного этапа детектирования точного времени появления аномалии предлагается использовать модель ARFIMA, которая способна спрогнозировать более точное ожидаемое значение сетевого трафика за счет использования дополнительного параметра d , который определяется, как $d=H-0,5$. На заключительной этапе, сравнение спрогнозированных данных, осуществляется с помощью вычисления MAPE по (1). Если MAPE превышает 10%, то данная точка определяется как начало/конец аномалии.

На рис. 5 представлены результаты применения модели ARFIMA для интервала времени (240-400 секунд), детектированного фрактальным анализом, красными точками на графике отмечены места, где спрогнозированные значения отличаются от реальных больше уста-

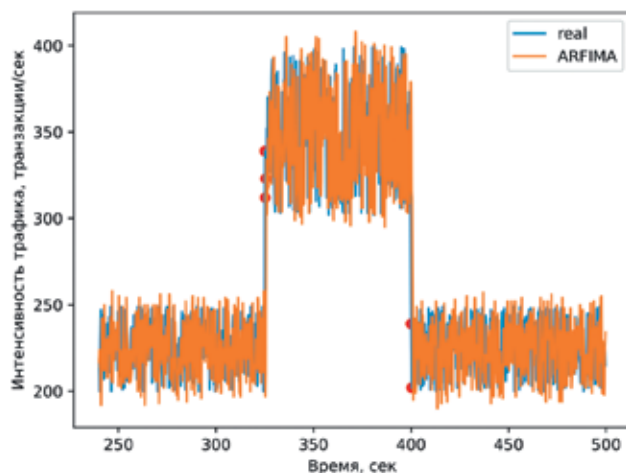


Рис. 5. Детектирование атаки с помощью ARFIMA.

новленного порога в 10%. Первая группа точек в районе 330 секунд указывает на начало атаки, вторая группа в 400 секунд указывает на окончание атаки.

Заключение

В результате исследования был предложен подход к обнаружению аномалий в самоподобном сетевом трафике, который заключается в определении показателя самоподобия, определяемый показателем Херста с помощью фрактального анализа и дополнительного детектирования аномалии с помощью статистического анализа. Преимущество описанного метода определения аномалий в сетевом трафике от отдельных методов фрактального или статистического анализа заключается в том, что данный метод, использующий гибридный подход и подобранные параметры трафика, позволяет выявлять в реальном и близком к реальному масштабу времени воздействие кибератак.

В работе был проведен сравнительный анализ фрактальных и статистических методов, в результате которого были определены более эффективные методы для использования в предлагаемом подходе. Для фрактального анализа выбран метод DFA, для статистического – ARFIMA. Метод DFA при тестировании фрактальных методов, позволяющих исследовать долговременные зависимости в трафике компьютерной сети, является более эффективным, чем R/S анализ, из-за его возможности обрабатывать не только стационарные, но и нестационарные ряды с высокой точностью. Модель ARFIMA позволяет спрогнозировать точные значения за счет использования дополнительного значения оценки длительной памяти, который задается фрактальной размерностью, определяемой при фрактальном анализе. Таким образом, использование предложенного гибридного подхода, включающих DFA и ARFIMA методы, позволяет повысить точность поиска аномалий в сетевом трафике.

Библиографический список

1. Перов Р.А., Лаута О.С., Крибель О.М., Федулов Ю.М. Комплексная методика обнаружения кибератак на основе интеграции фрактального анализа и статистических методов // Научные исследования в космических исследованиях Земли. 2022. № 2. С. 44-51. DOI: 10.36724/2409-5419-2022-14-2-44-51
2. Усков Е.Д., Корепанова Н.Л. Анализ информативных признаков аномалий сетевого трафика корпоративных сетей // Современные инновации. 2019. № 3(31). С. 13-16.
3. Суворов А.О., Суворова В.А. Интеллектуальный анализ сетевого трафика для идентификации компьютерных вторжений // Искусственный интеллект и принятие решений. 2019. № 1. С. 62-73. DOI: 10.14357/20718594190106
4. Барсуков И.С., Ряполов М.П., Бобрешов А.М. Алгоритм анализа фрактальных свойств трафика для

обнаружения сетевых аномалий // Радиолокация, навигация, связь: Сборник трудов XXVI Международной научно-технической конференции. 2020. Т. 4. С. 302-311.

5. Барсуков И.С., Ряполов М.П., Бобрешов А.М. Использование фрактальных свойств сетевого трафика для обнаружения LDoS-атак в клиент-серверных сетях // Нелинейный мир. 2019. Т. 17. № 2. С. 34-39. DOI: 10.18127/j20700970-201902-04

6. Барсуков И.С., Ряполов М.П. Использование фрактальных свойств трафика в цифровых сетях связи для детектирования сетевых аномалий // Вестник Воронежского государственного университета. 2018. № 3. С. 73-81.

7. Муллер Н.В., Младова Т.А. Комплексный анализ временных рядов с помощью фрактального и вейвлет-анализа // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2020. № 7(47). С. 20-25.

8. Латышев О.Г., Казак О.О. Тренд-анализ свойств породного массива на основе фрактального представления пространственных рядов // Известия Уральского государственного горного университета. 2018. № 2(50). С. 79-84. DOI: 10.21440/2307-2091-2018-2-79-84

9. Тумбинская М.В., Баянов Б.И., Рахимов Р.Ж. и др. Анализ и прогнозирование вредоносного сетевого трафика в облачных сервисах // Бизнес-информатика. 2019. Т. 13. № 1. С. 71-81.

10. Крибель А.М., Перов Р.А., Лаута О.С. и др. Модель выявления аномалий в сетевом трафике сети передачи данных в условиях компьютерных атак // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2022. № 5. С. 228-239.

11. Лаута О.С., Карпов М.А., Крибель А.М. и др. Анализ процесса самоподобия сетевого трафика как подход к обнаружению кибератак на компьютерные сети / В сб.: Состояние и перспективы развития современной науки по направлению «Информационная безопасность», 21–22 апреля 2021 года, Анапа. С. 311-327.

12. Татарникова Т.М. Статистические методы исследования сетевого трафика // Информационно-управляющие системы. 2018. № 5 (96). С. 35-43.

13. Джеффри Оуэн Кац, Донна Л., Мак Кормик. Энциклопедия торговых стратегий. М., Альпина Паблишер, 2002. 400 с.

14. Ямкин В.Н. Финансовый дилинг. Технический анализ. М., ИКФ Омега-Л., 2005. 480 с.

15. Гребенщикова А.А., Елагин В.С. Обзор модели авторегрессии и проинтегрированного скользящего среднего ARIMA для прогнозирования сетевого трафика. / В сб.: Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании, Санкт-Петербург, 24–25 февраля 2021 года. Т. 1. С-Пб: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, 2021. С. 266-271.

16. Дюсекенов Д.С., Тюменцев Е.А. Сравнительный анализ рекуррентных нейронных сетей и модели авторегрессии ARIMA при прогнозировании нестационарных

временных рядов / В сб.: Прикладная математика и фундаментальная информатика, Омск, 16–21 мая 2022 года. Омск: Омский государственный технический университет, 2022. С. 86-87.

17. Симонов П. М., Гарафутдинов Р. В. Моделирование и прогнозирование динамики курсов финансовых инструментов с применением эконометрических моделей и фрактального анализа. Вестник Пермского университета. Серия: Экономика, 2019, т. 14, № 2, с. 268-288. doi:10.17072/1994-9960-2019-2-268-288.

18. Bukhari A.H., Raja M.A.Z., Sulaiman M. et al. Fractional Neuro-Sequential ARFIMA-LSTM for Financial Market Forecasting // IEEE Access. 2020. Vol. 8. Pp. 71326-71338. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2985763.

References

1. Perov R.A., Laut O.S., Kribel A.M., Fedulov Yu.V. Complex method for detecting cyber attacks based on integration of fractal analysis and statistical methods. *High Tech in Earth Space Research* 2022;2:44-51. DOI: 10.36724/2409-5419-2022-14-2-44-51. (in Russ.)

2. Uskov E.D., Korepanova N.L. [Analysis of informative features of network traffic anomalies in corporate networks]. *Modern innovations* 2019;3(31):13-16. (in Russ.)

3. Suvorov A.O., Suvorova V.A. [Data mining of network traffic for identifying computer intrusions]. *Iskusstvennyy Intellekt i Prinyatie Resheniy* 2019;1:62-73. DOI: 10.14357/20718594190106. (in Russ.)

4. Barsukov I.S., Riapolov M.P., Bobreshov A.M. [An algorithm for analysing fractal properties of traffic for detecting network anomalies]. [Radar location, navigation, communication: Proceedings of the XXVI International Science and Engineering Conference] 2020;4:302-311. (in Russ.)

5. Barsukov I.S., Riapolov M.P., Bobreshov A.M. [Using fractal properties of network traffic for detecting LDoS attacks in dedicated server networks]. *Nelineyny mir* 2019;17(2):34-39. DOI: 10.18127/j20700970-201902-04. (in Russ.)

6. Barsukov I.S., Riapolov M.P. [Using fractal properties of traffic in digital communication networks for detecting network anomalies]. *Proceedings of Voronezh State University* 2018;3:73-81. (in Russ.)

7. Muller N.V., Mladova T.A. The complex analysis of time series using fractal and wavelet analysis. *Scholarly Notes of Komsomolsk-na-Amure State Technical University* 2020;7(47):20-25. (in Russ.)

8. Latyshev O.G., Kazak O.O. Trend analysis of the rock mass properties on the basis of fractal representation of spatial ranges. *News of the Ural State Mining University* 2018;2(50):79-84. DOI: 10.21440/2307-2091-2018-2-79-84. (in Russ.)

9. Tumbinskaya M.V., Bayanov B.I., Rakhimov R.Zh. et al. [Analysis and prediction of malicious network traffic in cloud services]. *Biznes-informatika* 2019;13(1):71-81. (in Russ.)

10. Kribel A.M., Perov R.A., Lauta O.S. et al. [Model of identifying anomalies in network traffic of a data communication network amid computer attacks]. *News of the Tula state university. Technical sciences* 2022;5:228-239. (in Russ.)

11. Lauta O.S., Karpov M.A., Kribel A.M. et al. [Analysis of the process of self-similarity of network traffic as an approach to identifying cyber attacks against computer networks]. In: [State of the art and prospects of development of the modern information security science, April 21-22, 2021, Anapa]. P. 311-327. (in Russ.)

12. Tatarnikova T.M. Statistical methods for studying network traffic. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy [Information and Control Systems]* 2018;5:35-43. (in Russ.)

13. Katz J.O., McCormick D.L. The Encyclopedia of Trading Strategies. Moscow: Alpina Publishing; 2002.

14. Yamkin V.N. [Financial dealing. A technical analysis]. Moscow: IKF Omeg-L; 2005. (in Russ.)

15. Grebenshchikova A.A., Yelagin V.S. [An overview of the autoregressive model and the ARIMA integrated running average for network traffic prediction]. In: [Topical problems of information telecommunications in science and education. Saint Petersburg, February 24-25, 2021. Vol. 1]. Saint Petersburg: The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State University of Telecommunications; 2021. P. 266-271. (in Russ.)

16. Diusekenov D.S., Tiumentsev E.A. [A comparative analysis of recurrent neural networks and the ARIMA autoregressive model with regard to the prediction of nonstationary time series]. In: [Applied mathematics and fundamental computer science. Omsk, May 16-21, 2022]. Omsk: Omsk State Technical University; 2022. P. 86-87. (in Russ.)

17. Simonov P.M., Garafutdinov R.V. [Simulation and prediction of financial instrument rates using econometric models and fractal analysis]. *Perm University Herald. Economy* 2019;14(2):268-288. doi:10.17072/1994-9960-2019-2-268-288. (in Russ.)

18. Bukhari A.H., Raja M.A.Z., Sulaiman M. et al. Fractional Neuro-Sequential ARFIMA-LSTM for Financial Market Forecasting. *IEEE Access* 2020;8:71326-71338. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2985763.

Сведения об авторах

Веселова Виктория Алексеевна – магистрант, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: viktoriavslv44@gmail.com.

Коломойцев Владимир Сергеевич – доцент, кандидат технических наук, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Российская Федерация, e-mail: Dekoros@guap.ru

About the authors

Viktoria A. Veselova, Master Student, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: viktoriavslv44@gmail.com.

Vladimir S. Kolomoitsev, Associate Professor, Candidate of Engineering, Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russian Federation, e-mail: Dekoros@guap.ru.

Вклад авторов в статью

Веселова В.А. – анализ литературы по теме исследования, проведено сравнение возможностей статистических и фрактальных методов анализа трафика, выполнены необходимые для исследования расчеты.

Коломойцев В.С. – предложен гибридный метод, проведено исследование эффективности применения предложенного метода.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Система массового обслуживания без очереди и с детерминированным временем обслуживания**

Queuing system without queue and deterministic service time**

Цициашвили Г.Ш.^{1*}, Радченкова Т.В.¹
Tsitsiashvili G.Sh.^{1*}, Radchenkova T.V.¹

¹Институт прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук, (ИПМ ДВО РАН), Владивосток, Российская Федерация

¹Institute of Applied Mathematics, Far Eastern Division, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation

*guram@iam.dvo.ru



Цициашвили Г.Ш.



Радченкова Т.В.

Резюме. В настоящее время интенсивно исследуются системы массового обслуживания, описывающие отказы в процессе тестирования программного обеспечения. В этих системах предполагается зависимость между интенсивностью входного пуассоновского потока и интенсивностью экспоненциально распределенного времени обслуживания. С помощью этой зависимости строятся процедуры сглаживания пиковой нагрузки в системе. Однако для систем с детерминированным временем обслуживания такая модель и метод ее исследования непригодны. Поэтому в данной работе исследуется зависимость параметра распределения Пуассона количества заявок в системе от детерминированного времени обслуживания при наличии пика интенсивности входного потока. Эта зависимость исследована аналитически и численно, и показано, как сокращение времени обслуживания сглаживает пик количества клиентов в системе.

Abstract. Today, queueing systems that describe failures in the process of software testing are subject to extensive research. Such systems involve a dependence between the rate of an input Poisson stream and the rate of exponentially distributed handling time. Using this dependence, system load levelling procedures are defined. However, such a model and method of research are not suitable for systems with a deterministic handling time. Therefore, this paper examines the dependence of the Poisson distribution parameter of the number of requests in a system from the deterministic handling time in the presence of a peak rate of the input stream. This dependence is examined analytically and numerically. It is shown that a reduction of the handling time levels the peak number of customers in the system.

Ключевые слова: пуассоновский поток, детерминированное время обслуживания, система массового обслуживания с бесконечным числом приборов.

Keywords: Poisson stream, deterministic processing time, queueing system with an infinite number of devices.

Для цитирования: Цициашвили Г.Ш., Радченкова Т.В. Система массового обслуживания без очереди и с детерминированным временем обслуживания // Надежность. 2023. №2. С. 64-67. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-2-64-67>

For citation: Tsitsiashvili G.Sh., Radchenkova T.V. Queuing system without queue and deterministic service time. Dependability 2023;2:64-67. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-2-64-67>

Поступила: 21.02.2023 / **После доработки:** 24.04.2023 / **К печати:** 15.06.2023

Received on: 21.02.2023 / **Revised on:** 24.04.2023 / **For printing:** 15.06.2023

** Tsitsiashvili G., Radchenkova T. Queuing System Without Queue and Deterministic Service Time // Reliability: Theory & Applications. 2022. Vol. 17. No. 3(69). Pp. 301-305. DOI:10.24412/1932-2321-2022-369-301-305

Введение

Системы массового обслуживания, описывающие отказы в процессе тестирования программного обеспечения, в настоящее время интенсивно исследуются. Особенностью этих систем является зависимость между интенсивностью входного пуассоновского потока и интенсивностью экспоненциально распределенного времени обслуживания. Эта зависимость позволяет сгладить пик количества клиентов в системе, вызванный пиком интенсивности входного потока. Но существует широкий спектр таких систем массового обслуживания, в которых время обслуживания является детерминированным. В данной работе исследуется зависимость параметра распределения Пуассона количества заявок в системе от детерминированного времени обслуживания при наличии пика интенсивности входного потока. Эта зависимость исследована аналитически и численно, и показано, как сокращение времени обслуживания сглаживает пик количества клиентов в системе.

В [1] данные об ошибках собираются в процессе тестирования при разработке программного обеспечения. Авторы проводят моделирование на основе системы массового обслуживания с бесконечным числом приборов, используя сгенерированные выборочные данные о времени обнаружения неисправностей, чтобы визуализировать эффективность действий по устранению неисправностей. Они применяют метод уточнения, используя функции интенсивности моделей роста надежности программного обеспечения с задержкой S-образной формы и перегибом S-образной формы [2], [3] для генерации выборочных данных о времени обнаружения неисправностей из данных подсчета неисправностей. В результате моделирование, основанное на системе с бесконечным числом приборов, с использованием сгенерированных выборочных данных времени обнаружения неисправностей для визуализации эффективности действий по устранению неисправностей, выполняется в условиях нестационарной интенсивности входного потока. Такой подход позволяет поставить вопрос о поведении системы массового обслуживания в режиме пиковой нагрузки.

Однако включение в модель массового обслуживания зависимости между интенсивностями входного потока и обслуживания может быть слишком ограничительным. Действительно, если мы предположим, что время обслуживания клиентов детерминировано, то такое ограничение больше не работает. В то же время аналогичная система массового обслуживания, основанная на модели с бесконечным числом приборов, встречается и в других приложениях, например, в системе допуска посетителей к услугам (например, на спортивное сооружение) [4]. Более того, детерминированное распределение времени обслуживания в сочетании с приемом посетителей в произвольное время оказывается очень удобным инструментом для

привлечения их к обслуживанию. Для этой модели возникает вопрос, какими способами можно уменьшить количество заявок в системе в режиме пиковой нагрузки. В этой статье показано, что изменение детерминированного времени обслуживания является фактором, который может существенно повлиять на поведение системы в режиме пиковой нагрузки.

1. Нестационарная пуассоновская модель непрерывно функционирующей системы обслуживания

Расчет нестационарных моделей массового обслуживания обычно намного сложнее, чем расчет стационарных моделей. Однако многие системы бытового обслуживания обычно являются нестационарными. Поэтому необходимо построить нестационарную модель массового обслуживания таким образом, чтобы ее расчет был достаточно простым и удобным.

В данной работе это может быть достигнуто путем допущения детерминированности времени обслуживания и пуассоновости входного нестационарного потока заявок.

Рассмотрим модель системы массового обслуживания, в которой заявки образуют следующий пуассоновский поток. Каждая заявка находится в системе в течение времени a , затем покидает систему. Моменты поступления заявок в систему образуют пуассоновский поток с интенсивностью $\lambda(t)$, $-\infty < t < \infty$. Особенностью данной модели является ее нестационарность и возможность включения в нее группового приема клиентов с различными параметрами пуассоновского распределения их численности.

Таким образом, данная модель адаптируется к условиям функционирования реальных систем обслуживания: непрерывно действующих плавательных бассейнов, открытых катков, тренажерных залов, залов аэробики и фитнеса, лыжных баз. На языке теории массового обслуживания такая система может быть интерпретирована как система с пуассоновским потоком заявок с меняющейся интенсивностью, бесконечным числом приборов и детерминированным временем обслуживания.

Здесь функция $\lambda(t)$ предполагается непрерывной при $0 \leq t \leq T - a$,

$$\lambda(t) = 0, t < 0 \text{ или } T - a \leq t.$$

В качестве примера такого потока мы можем предположить, что это посетители непрерывно работающего бассейна, приходящие в произвольное время. Тогда в течение фиксированного времени t , $0 \leq t \leq T$, количество пользователей, пришедших в систему, имеет распределение Пуассона с параметром

$$\Lambda(t) = \int_{t-a}^t \lambda(t) dt, 0 \leq t \leq T. \quad (1)$$

Эта нестационарная модель массового обслуживания может иметь много обобщений: многофазные системы и ациклические сети обслуживания, системы с несколькими потоками, имеющими разное детерминированное время обслуживания, и т.д. Он также может быть применен для расчета конвейерных систем для обработки деталей.

2. Основные свойства нестационарной модели с детерминированным временем обслуживания

Пусть функция $\lambda(t)$ имеет единственный экстремум (максимум) в момент времени $t_* > a$. Следовательно, $\lambda(t)$ является неубывающей на интервале $0 \leq t < t_*$ и невозрастающей на полуинтервале $t_* < t \leq T - a$. Из формулы (1) следует, что функция $\Lambda(t)$ имеет максимум в точке t^* , если выполняется соотношение

$$\Lambda'(t) = \lambda(t^*) - \lambda(t^* - a) = 0. \quad (2)$$

Свойство 1. Из условий для функции $\lambda(t)$ следует, что

$$t_* < t^* < t_* + a. \quad (3)$$

Таким образом, максимум функции $\Lambda(t)$ сдвинут вправо по отношению к максимуму функции $\lambda(t)$.

Свойство 2. Из формулы (1) получаем, что

$$\Lambda(t^*) \leq a\lambda(t_*). \quad (4)$$

Таким образом, уменьшение параметра a позволяет сгладить пик функции $\Lambda(t)$.

Свойство 3. Если выполняется следующее условие

$$2a = T \int_0^{T-a} \lambda(t) dt \geq \lambda(t_*), \quad (5)$$

то пик функции $\Lambda(t)$ может быть выше, чем пик функции $\lambda(t)$:

$$\Lambda(t^*) \geq \lambda(t_*). \quad (6)$$

Другим условием для выполнения соотношения (6) является формула

$$\lambda(t) \geq \lambda_*, \quad 0 < t \leq T - a, \quad a\lambda_* \geq \lambda(t_*). \quad (7)$$

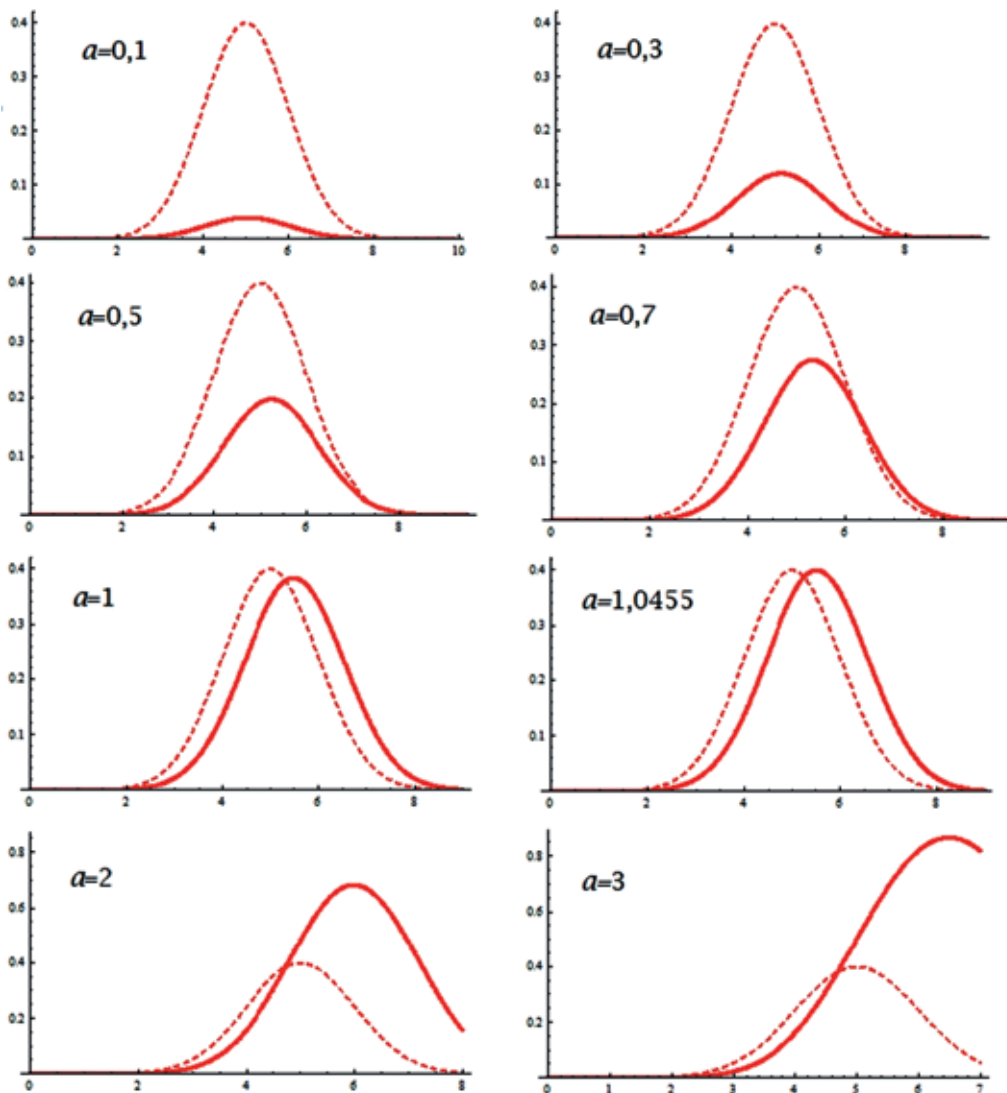


Рис. 1. Графики функций $\lambda(t)$ (пунктирная линия), $\Lambda(t)$ (сплошная линия) при $T = 10$, $b = 5$, $c = 1$

3. Вычислительные эксперименты

Все эксперименты выполняются для функции

$$\lambda(t) = \frac{\exp\left(-\frac{(t-b)^2}{(2c)}\right)}{\sqrt{2\pi c}}, 0 < t < T-a, \lambda(t) = 0, t \leq 0$$

или $T-a \leq t$

с различными значениями параметра a .

Рис. 1 показывает, что увеличение параметра a приводит к увеличению функции $\Lambda(t)$ и к сдвигу вправо ее максимума по отношению к функции $\lambda(t)$.

4. Обсуждение

Результаты аналитического исследования функции $\Lambda(t)$ показали, что параметр a , который характеризует детерминированное время обслуживания клиентов в этой системе без очереди, является удобным инструментом для сглаживания пиковой нагрузки, характеризуемой интенсивностью входного потока. Свойства модели массового обслуживания с бесконечным числом приборов и детерминированным временем обслуживания, установленные аналитически и в вычислительных экспериментах, позволяют нам увидеть, как время обслуживания влияет на параметр пуассоновского распределения количества клиентов в системе. Уменьшение этого параметра приводит к сглаживанию пика интенсивности входного потока, а увеличение приводит к увеличению этого пика. Таким образом, данное исследование позволяет нам определить, как выбрать время обслуживания, чтобы ослабить пиковые нагрузки в системе.

5. Заключение

Свойства модели массового обслуживания с бесконечным числом приборов и детерминированным временем обслуживания, установленные в работе аналитически и в вычислительных экспериментах, позволяют нам увидеть, как время обслуживания влияет на параметр пуассоновского распределения количества заявок в системе. Уменьшение этого параметра приводит к сглаживанию пика интенсивности входного потока, а увеличение приводит к увеличению этого пика. Таким образом, данное исследование позволяет нам определить, как выбрать время обслуживания, чтобы ослабить пиковые нагрузки в системе.

Библиографический список

1. Minamino Y., Makita Y., Inoue Sh. et al. Efficiency Evaluation of Software Faults Correction Based on Queuing Simulation // *Mathematics*. 2022. No. 10 (9). P. 1438.
2. Pham H. *Software Reliability*. Springer-Verlag, Singapore, 2000.
3. Yamada S. *Software Reliability Modelling, Fundamentals and Applications*. Springer-Verlag, 132, Tokyo/Heidelberg, 2014.

4. Tsitsiashvili G. Sh. Non-stationary Poisson model of a continuously functioning queuing system. *Journal of Physics: Conference Series* // The XIII International Conference Computer-Aided Technologies in Applied Mathematics (ICAM 2020). 2020. 1680 (1): 01205013.

References

1. Minamino Y., Makita Y., Inoue Sh. et al. Efficiency Evaluation of Software Faults Correction Based on Queuing Simulation. *Mathematics* 2022;10 (9):1438.
2. Pham H. *Software Reliability*. Springer-Verlag: Singapore; 2000.
3. Yamada S. *Software Reliability Modelling, Fundamentals and Applications*. Springer-Verlag, 132, Tokyo/Heidelberg; 2014.
4. Tsitsiashvili G.Sh. Non-stationary Poisson model of a continuously functioning queuing system. *Journal of Physics: Conference Series*. The XIII International Conference Computer-Aided Technologies in Applied Mathematics (ICAM 2020) 2020;1680(1):01205013.

Сведения об авторах

Цициашвили Гурами Шалвович – главный научный сотрудник, доктор физмат наук, Институт прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук, ул. Радио, 7, Владивосток, Российская Федерация, 690041, e-mail: guram@iam.dvo.ru

Радченкова Татьяна Вадимовна – инженер-исследователь, Институт прикладной математики Дальневосточного отделения Российской академии наук, ул. Радио, 7, Владивосток, Российская Федерация, 690041, e-mail: tarad@yandex.ru

About the authors

Gurami Sh. Tsitsiashvili, Chief Researcher, Doctor of Physics and Mathematics, Institute of Applied Mathematics, Far Eastern Division, Russian Academy of Sciences, 7 Radio st., 690041, Vladivostok, Russian Federation, e-mail: guram@iam.dvo.ru

Tatiana V. Radchenkova, Research Engineer, Institute of Applied Mathematics, Far Eastern Division, Russian Academy of Sciences, 7 Radio st., 690041, Vladivostok, Russian Federation, e-mail: tarad@yandex.ru.

Вклад авторов в статью

Цициашвили Г.Ш. – разработка модели объекта в реальных условиях эксплуатации и проведено аналитическое исследование модели

Радченкова Т.В. – проведение исследования модели в вычислительном эксперименте

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



Azerbaijan State
Marine Academy



Politecnico di Milano,
Italy



European Safety and
Reliability Association



City University of
Hong Kong



Gredenko Forum
International Group
on Reliability, the USA



Qingdao University
China

THE FIFTH EURASIAN RISK 2023 CONFERENCE

JOINTLY ORGANIZED BY



AMIR TECHNICAL
SERVICES LLC

www.eurasianrisk2023.com

ОРГАНИЗАТОРЫ

- Международная компания организатор мероприятий AMIR Technical Services
- Азербайджанская Государственная Морская Академия
- Politecnico di Milano, Italy
- City University of Hong Kong
- International Group on Reliability - Gredenko Forum, USA
- European Safety and Reliability Association (ESRA)
- Qingdao University, China

ОБСУЖДАЕМЫЕ ПРОБЛЕМЫ

- Оценка, анализ и управление рисками
- Функциональная безопасность и надежность
- Промышленные риски в нефтегазовом секторе
- Стихийные бедствия, EWS, экосистемы, загрязнение и принятие решений
- Человеческий фактор и устойчивость
- Каскадные риски и мультидисциплинарные расследования

КЛЮЧЕВЫЕ ДАТЫ

Окончание регистрации и приема статей

12 августа 2023 г.

Объявление программы

18 сентября 2023 г.

Конференция

17-19 октября 2023 г.

Гала-банкет в честь участников

18 октября 2023 г.

Рабочие языки конференции: английский и русский. Будет доступен синхронный перевод докладов. Статьи объемом до 8 страниц принимаются только на английском языке. Правила оформления представлены на сайте конференции. Все статьи в обязательном порядке проходят рецензирование. Отобранные статьи будут опубликованы в изданиях, индексируемых международной базой Scopus и Web of Science. Один автор может представить в качестве докладчика не более двух статей. Регистрационные заявки (форма регистрационной заявки размещена на сайте) и статьи следует отправлять на электронный адрес председателя конференции: prof.vugar.aliyev@gmail.com.

По любым вопросам, связанным с участием в конференции, обращайтесь к организаторам:

E-mail: prof.vugar.aliyev@gmail.com

Mobile: +99450 212 55 45 (WhatsApp)

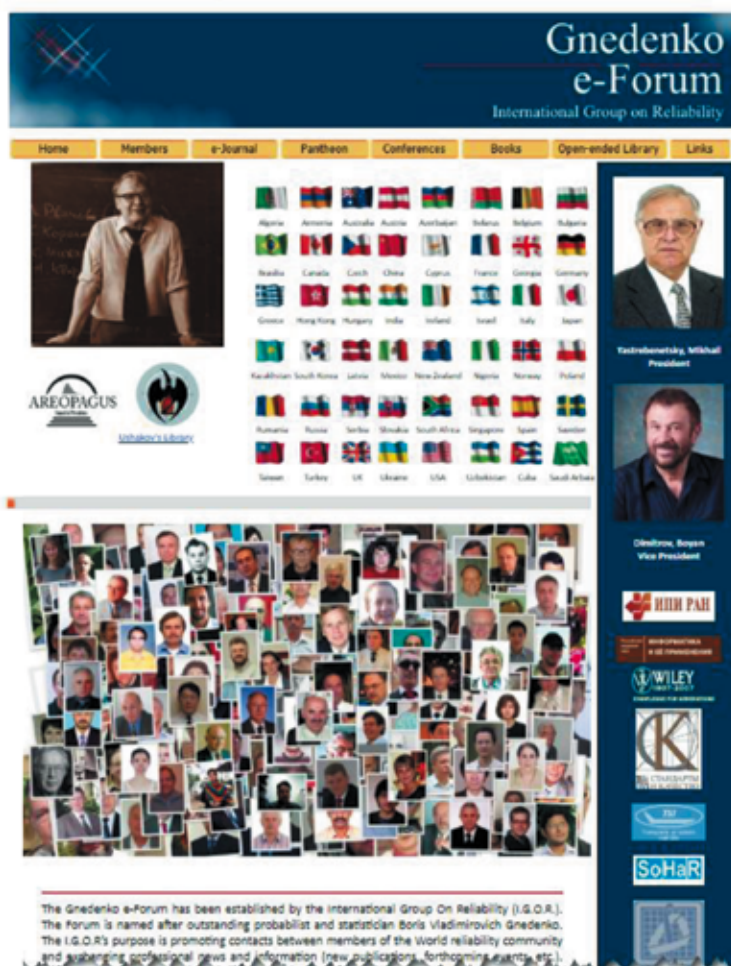
AMIR Technical Services LLC





GNEDENKO FORUM

INTERNATIONAL GROUP ON RELIABILITY



The Gnedenko e-Forum has been established by the International Group On Reliability (I.G.O.R.). The Forum is named after outstanding probabilist and statistician Boris Vladimirovich Gnedenko. The I.G.O.R.'s purpose is promoting contacts between members of the World reliability community and exchanging professional news and information (new publications, forthcoming events, etc.).

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

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

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

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

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

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

С 2017 года журнал индексируется в международной базе Scopus.



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

www.gnedenko.net

ТРЕБОВАНИЯ РЕДАКЦИИ ПО ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛАХ ИЗДАТЕЛЬСКОЙ ГРУППЫ IDT PUBLISHERS

Требования к формату статьи

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

Структура материала статьи

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

1) Название статьи

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

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

Пример:

Повышение надежности электронных компонентов
The Increasing of dependability of electronic components

2) Фамилия И.О. автора (авторов)

Данный структурный элемент для каждого автора включает:

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

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

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

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

Пример:

Иванова А.А.¹, Петров В.В.^{2*}

Anna A. Ivanova, Victor V. Petrov

3) Место работы автора (авторов)

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

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

Пример:

¹Московский государственный университет, Российская Федерация, Москва

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

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

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

Пример:

*petrov_vv@aaa.ru

5) Резюме статьи

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

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

Пример (на рус. яз.):

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

6) Ключевые слова

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

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

Пример (на рус. яз.):

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

7) Текст статьи

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

Оформление:

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

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

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

где n – количество изделий.

Пример:

1. Состояние вопроса повышения надежности электронных компонентов

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

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

Рис. 2. Описание жизненно важных процессов

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

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

Табл. 2. Описание жизненно важных процессов

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

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

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

Формулы могут быть включены непосредственно в текст, например:

Пусть $y = a \cdot x + b$, тогда...

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

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

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

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

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

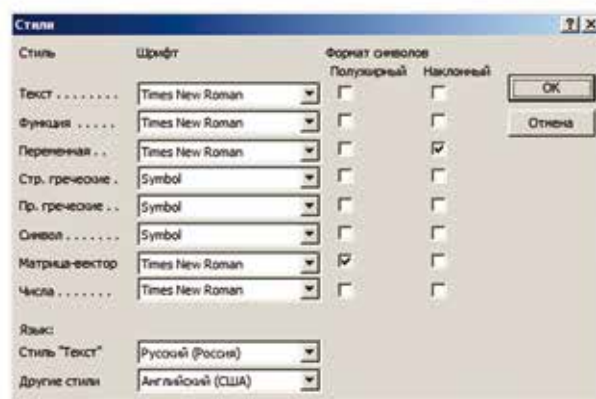
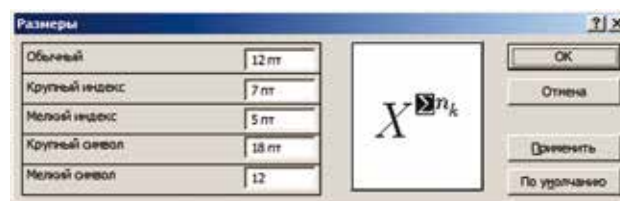
Простые формулы следует набирать без применения формульного редактора (использовать в MS Word русские и латинские буквы, а также меню «Вставка» + «Символ», если требуются греческие буквы и математические операторы), с соблюдением требуемого наклона для латинских символов, например:

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

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

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

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



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

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

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

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

8) Благодарности

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