

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, ремонтнопригодности 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 20.11.2023

Объем , Тираж 500 экз, Заказ №

Формат 60x90/8, 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»)**

Журнал разносторонне освещает проблемы надёжности, отказоустойчивости, безопасности, рисков, живучести, интеллектуального управления транспортом и активами.

Рубрики журнала

- Структурная надёжность
- Функциональная надёжность
- Отказоустойчивость
- Функциональная безопасность
- Системный анализ в задачах надёжности и безопасности
- Управление рисками
- Живучесть
- Техническая эффективность автоматизированных систем управления
- Управление активами
- Обработка больших данных. Системы управления и искусственный интеллект
- Интеллектуальные транспортные системы
- Методы и системы защиты информации. Информационная безопасность
- Дискуссия по терминологии надёжности, отказоустойчивости, безопасности, рисков и живучести
- Стандартизация и сертификация
- Сообщения

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

Системный анализ в задачах надёжности и безопасности

Карманов А.В., Орлова К.П., Серкин В.Е., Токарев М.А. Решение задачи устойчивости стационарного показателя качества сложных технических систем 3

Адитья Тивари. Клиентоориентированные индексы и оценка надёжности сложносамкнутой системы распределения электроэнергии 8

Жигирев Н.Н., Бочков А.В., Кузьминова А.В. Инверсионный метод оценки меры согласованности мнений экспертов 15

Обработка больших данных. Искусственный интеллект

Бурсиан Е.Ю., Проурзин В.А., Проурзин О.В. Сравнительный анализ методов оценки надёжности по большим данным эксплуатации сложных систем 25

Наумов И.В. Прогностические модели надёжности передачи электрической энергии (на примере АО «Тываэнерго») 31

Функциональная надёжность. Теория и практика

Орлова Е.А., Фомин Н.И. Методическое обеспечение надёжности камеральной оценки достоверности исполнительных геодезических схем 39

Красильников Г.Т., Крачко Э.А., Мальчинский Ф.В., Додова Л.М., Медяникова Л.М. Исследование влияния гендерных особенностей личности обучающихся в летном училище на успешность прохождения их обучения 45

Методы и системы защиты информации. Информационная безопасность

Панков Д.А., Панков И.А. Обнаружение системных дефектов цифровых устройств при имитации неисправностей с применением фаззинга 51

Гнеденко – Форум 59

Решение задачи устойчивости стационарного показателя качества сложных технических систем

Solving the problem of stability of the stationary quality indicator of complex technical systems

Карманов А.В.^{1*}, Орлова К.П.¹, Серкин В.Е.¹, Токарев М.А.¹

Karmanov A.V.^{1*}, Orlova K.P.¹, Serkin V.E.¹, Tokarev M.A.¹

¹ Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, Российская Федерация, Москва

¹ Gubkin University, Russian Federation, Moscow

*ABKar2007@yandex.ru



Карманов А.В.



Орлова К.П.



Серкин В.Е.



Токарев М.А.

Резюме. Цель. Формирование и решение задачи устойчивости стационарного показателя качества функционирования сложной технической системы. При этом случайный процесс блуждания системы по своим возможным состояниям описывается однородным Марковским процессом. Задача устойчивости состоит в определении таких стационарных (финальных) вероятностей Марковского процесса, на которых реализуются максимальное и минимальное значения показателя качества при условии, что интенсивности переходов по состояниям имеют интервальные оценки и эти интенсивности обуславливаются процессом отказов и восстановлений элементов системы. Стационарный показатель качества имеет достаточно общий вид и представляет собой скалярное произведение вектора финальных вероятностей Марковского процесса на вектор, характеризующий «вес» каждого состояния, где под «весом» могут пониматься различные содержательные характеристики состояний. **Методы.** В статье используются математические методы оптимального управления Марковским процессом с вектора дохода специального вида и линейного программирования. **Результаты.** Предлагается и обосновывается метод решения задачи устойчивости стационарного показателя качества функционирования сложной технической системы, а также излагается численный алгоритм решения поставленной задачи. Приводится пример решения задачи устойчивости с показателем качества, представляющим собой «штрафную» функцию. **Заключение.** Обсуждается проблема численного решения задачи устойчивости большой размерности.

Abstract. Aim. To define and solve the problem of stability of the stationary quality indicator of a complex technical system. The random process of the system's walking by its possible states is described with a homogeneous Markov process. The stability problem consists in defining such stationary (final) probabilities of the Markov process that implement the maximum and minimal values of the quality indicator, provided that the rate of state transitions have interval estimations and the rates are conditioned by the process of failures and recoveries of the system's elements. The stationary quality indicator has a fairly standard form and is a scalar product of the final probability vector of the Markov process and the vector that characterises the "weight" of each state, where "weight" may be understood as various contentive characteristics of states. **Methods.** The paper uses mathematical methods of optimal control of a Markov process using an income vector of a special form and linear programming. **Results.** A method is proposed and substantiated for solving the problem of stability of a stationary indicator of the quality of operation of a complex technical system. A numerical algorithm for solving the above problem is presented as well. The paper gives an example of the solution of a problem of stability with quality indicator that is a "penalty" function. **Conclusion.** The paper discusses the problem of numerical solution of the stability problem of a large dimensionality.

Ключевые слова: надежность, устойчивость, однородный Марковский процесс, показатели качества, интервальные оценки.

Keywords: dependability, stability, homogeneous Markov process, quality indicator, interval estimations.

Для цитирования: Карманов А.В., Орлова К.П., Серкин В.Е., Токарев М. А. Решение задачи устойчивости стационарного показателя качества сложных технических систем // Надежность. 2023. №4. С. 3-7. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-4-3-7>

For citation: Karmanov A.V., Orlova K.P., Serkin V.E., Tokarev M.A. Solving the problem of stability of the stationary quality indicator of complex technical systems. Dependability 2023;4:3-7. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-4-3-7>

Поступила: 17.04.2023 / **После доработки:** 27.10.2023 / **К печати:** 20.11.2023

Received on: 17.04.2023 / **Upon revision:** 27.10.2023 / **For printing:** 20.11.2023

Введение

Многие показатели надежности сложных технических систем, характеризующие качество их функционирования, рассчитываются с привлечением аппарата однородных Марковских процессов (ОМП) [1]. Часто эти показатели основываются на значениях стационарных (финальных) вероятностей ОМП. К таким показателям относятся стационарные коэффициенты готовности, технического использования и тому подобные коэффициенты, а также некоторые виды интегральных показателей качества функционирования технических систем.

В качестве примера интегральных показателей качества укажем следующие два показателя: значение штрафной функции, определяемой санкциями за несвоевременную поставку продукции; вероятность выполнения плана поставки. Такие показатели часто используются при оценке качества функционирования сложных систем, в частности таких, как магистральные газо- или нефтепроводы [2, 3, 4]. Эти системы предназначены для обеспечения бесперебойной поставки продукции потребителям в течение длительного времени и имеют в своем составе многочисленные восстанавливаемые, в том числе и резервные элементы.

Функционирование системы во времени можно представить процессом ее случайного блуждания по своим возможным состояниям, и этот процесс определяется случайным процессом отказов и восстановлений элементов системы. Он достаточно адекватно описывается ОМП с конечным числом состояний [2, 3, 4]. Стационарный показатель качества функционирования такой системы, в общем виде, можно представить следующей линейной формой:

$$Q(c, \pi) = c_1 \cdot \pi_1 + \dots + c_n \cdot \pi_n, \quad (1)$$

где $\pi = [\pi_1, \dots, \pi_n]$ – вектор финальных вероятностей ОМП; $\pi_1 + \dots + \pi_n = 1$, $c = [c_1, \dots, c_n]$ – вектор «весов»; n – число состояний. Каждая координата c_i , где $i = 1, \dots, n$, вектора c является числовым параметром, характеризующим «вес» состояния i . Например, для стационарного коэффициента готовности форма (1) примет вид: $Q(c, \pi) = \pi(J_1)$, где $\pi(J_1) = \sum_{i \in J_1} \pi_i$, J_1 – подмножество работоспособных состояний системы. Понятно, что в этом случае все c_i , для которых $i \in J_1$, равны единице, а остальные нулю.

Другой вид показателя качества – штрафная функция – рассматривается в примере, приведенного в конце этой статьи. Там «вес» c_i представляет собой денежные потери за попадание ОМП в состояние i .

На практике интенсивности отказов и восстановлений элементов сложной системы, которые формируют матрицу интенсивностей ОМП, часто имеют не точечную, а интервальную оценку своих значений. Например, эти интенсивности определяются обработкой статистических данных по отказам и восстановлениям элементов системы в процессе ее эксплуатации. При этом корректно их оценивать доверительными интервалами.

В указанных условиях становится актуальной задача устойчивости показателя качества, представленного выражением (1), по отношению к изменениям интенсивностей в пределах своих интервальных оценок.

Решению указанной задачи посвящается настоящая статья. При этом для изложения численной процедуры ее решения используется математический аппарат оптимального управления однородным Марковским процессом с доходом, имеющим специальный вид.

1. Постановка задачи устойчивости.

Рассмотрим ОМП $\xi(t)$ с доходом и конечным множеством сообщающихся состояний, который можно задать следующей совокупностью исходных данных:

$$(J, p(0), \Lambda, q), \quad (2)$$

где $J = \{1, \dots, n\}$ – множество состояний, $p(0) = [p_1(0), \dots, p_n(0)]$ – стохастический вектор начального распределения, $\Lambda = \{\lambda_{i,j}\}$ – матрица интенсивностей порядка n , для элементов которой выполняется следующее условие:

$[\lambda_{i,j} \geq 0, i \neq j; \lambda_{i,i} = -\sum_{j \neq i} \lambda_{i,j}; \sum_{j=1}^n \lambda_{i,j} = 0]$, и не все $\lambda_{i,j}$ равны нулю; $q = [q_1, \dots, q_n]^T$ – вектор, именуемый в [5] вектором «нормы выручки», T – знак транспонирования.

Отметим следующие обстоятельства:

1) J совпадает с множеством возможных состояний технической системы, $\lambda_{i,j}$ представляет собой интенсивность перехода технической системы из состояния i в состояние j , $i \neq j$, $i \in J, j \in J$;

2) финальные вероятности $\pi_i(\Lambda)$, $i = 1, \dots, n$ процесса $\xi(t)$ не зависят от начального распределения $p(0)$ и вектора q [1, 5], а зависят только от элементов матрицы Λ ;

3) каждая положительная интенсивность $\lambda_{i,j}$ имеет интервальную оценку, т.е.

$$I_{i,j} = [0 < \lambda_{i,j}^{(1)} \leq \lambda_{i,j} \leq \lambda_{i,j}^{(2)}]; \quad (3)$$

4) если обозначить через Z множество всевозможных матриц интенсивностей $\Lambda = \{\lambda_{i,j}\}$, для компонент которых справедливо выражение (3), то это множество можно представить в виде:

$$Z = \{\Lambda \mid \lambda_{i,j} \in I_{i,j}, i \neq j, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n\}. \quad (4)$$

Пусть вектор «нормы выручки» имеет следующий частный вид:

$$q^{(i)} = [q_1^{(i)}, \dots, q_n^{(i)}]^T, \quad (5)$$

где $i = 1, \dots, n$; $q^{(i)}$ – вектор, у которого i -ая координата равна единице, а остальные координаты – нулю. Тогда для любой матрицы $\Lambda \in Z$ справедливо выражение:

$$\pi_i(\Lambda) = \pi(\Lambda) \cdot q^{(i)}, \quad (6)$$

где $\pi(\Lambda) = [\pi_1(\Lambda), \dots, \pi_n(\Lambda)]$ – вектор финальных вероятностей ОМП.

Задача устойчивости линейной формы (1) формулируется следующим образом: найти такие стохастические векторы $\pi^* = [\pi_1^*, \dots, \pi_n^*]$ и $\pi^{**} = [\pi_1^{**}, \dots, \pi_n^{**}]$, которые удовлетворяют следующим соотношениям:

$$Q(c, \pi^*) = \max \left\{ Q(c, \pi) \mid \pi_i^{(1)} \leq \pi_i \leq \pi_i^{(2)}, \right. \\ \left. i = 1, \dots, n, \pi_1 + \dots + \pi_n = 1 \right\}, \quad (7)$$

$$Q(c, \pi^{**}) = \min \left\{ Q(c, \pi) \mid \pi_i^{(1)} \leq \pi_i \leq \pi_i^{(2)}, \right. \\ \left. i = 1, \dots, n, \pi_1 + \dots + \pi_n = 1 \right\}, \quad (8)$$

$$\text{где } \pi_i^{(1)} = \min \{ \pi_i(\Lambda) = \pi(\Lambda) \cdot q^{(i)} \mid \Lambda \in Z \}, \quad (9)$$

$$\pi_i^{(2)} = \max \{ \pi_i(\Lambda) = \pi(\Lambda) \cdot q^{(i)} \mid \Lambda \in Z \}. \quad (10)$$

В том случае, если задача устойчивости решена и определена величина $a(Q) = Q(c, \pi^*) - Q(c, \pi^{**})$, то можно рассчитать коэффициент K устойчивости полученного решения относительно среднего изменения $b_{i,j} = \lambda_{i,j}^{(2)} - \lambda_{i,j}^{(1)}$ каждой интенсивности $\lambda_{i,j} \in I_{i,j}$, например, следующим образом:

$$K = \Delta(Q) : \delta(I), \quad (11)$$

где $\Delta(Q)$ – относительное отклонение решения от вычисленного среднего значения формы (1), т.е. $\Delta(Q) = a(Q) \cdot Q_c^{-1}$, $Q_c = Q(c, \pi^{**}) + a(Q) \cdot 2^{-1}$; $\delta(I)$ – среднее относительное отклонение интенсивностей, т.е.

$$\delta(I) = \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j \neq i} \left(b_{i,j} \cdot 2^{-1} \cdot \lambda_{i,j}^{-1} \right) \right] \cdot [n \cdot (n-1)]^{-1}, \quad b_{i,j} = \lambda_{i,j}^{(2)} - \lambda_{i,j}^{(1)}, \\ \lambda_{i,j,c} = (\lambda_{i,j}^{(1)} + b_{i,j} \cdot 2^{-1}).$$

Таким образом, коэффициент K показывает отношение относительного изменения значения формы (1) к среднему относительному изменению каждой положительной интенсивности $\lambda_{i,j}$ в пределах интервалов $I_{i,j}$.

Замечание. Если имеется значение величины $a(Q) = Q(c, \pi^*) - Q(c, \pi^{**})$, то можно сформировать иной, чем выше введенный, коэффициент, характеризующий устойчивость формы (1), в зависимости от целей его дальнейшего использования.

2. Решение задачи устойчивости.

Решение задачи устойчивости показателя качества, представленного выражением (1), состоит, из последовательного осуществления следующих двух основных этапов:

Этап I. Нахождение алгоритмов определения векторов $(\pi_1^{(1)}, \dots, \pi_n^{(1)})$ и $(\pi_1^{(2)}, \dots, \pi_n^{(2)})$, являющихся решением задач (9) и (10).

Этап II. Указание алгоритмов определения векторов $\pi^* = [\pi_1^*, \dots, \pi_n^*]$, $\pi^{**} = [\pi_1^{**}, \dots, \pi_n^{**}]$ и величин $Q(c, \pi^*)$, $Q(c, \pi^{**})$, являющихся решениями задач (7) и (8).

2.1. Необходимые сведения для решения задачи устойчивости.

Для реализации указанных этапов приведем необходимые сведения из теории ОМП, которые будут использоваться для построения алгоритмов решения задач (9) и (10).

Пусть имеется ОМП с доходом, задаваемый совокупностью исходных данных (2). Тогда финальные вероятности $\pi_i = \pi_i(\Lambda)$, $i = 1, \dots, n$ определяются как единственное решение [1, 6] следующей системы линейных уравнений:

$$-\left(\sum_{j=1, j \neq i}^n \lambda_{i,j} \right) \cdot \pi_i + \sum_{i=1, i \neq j}^n (\lambda_{j,i} \cdot \pi_j) = 0, \quad i = 1, \dots, n, \quad (12)$$

для которой выполнено условие А: последнее n -ое уравнение заменяется соотношением:

$$\pi_1 + \dots + \pi_n = 1. \quad (13)$$

Если матрицу Λ^T , для которой выполнено условие А, обозначить через Λ_n , то система (12) в матричном виде примет вид:

$$\Lambda_n \cdot \pi^T = e, \quad (14)$$

где $e = [e_1, \dots, e_n]^T$ – вектор, в котором координата e_n равна единице, а остальные – нулю. При этом решение системы (14) можно представить в виде:

$$\pi_i = \pi_i(\Lambda) = \frac{\Delta_i(\Lambda_n)}{\Delta(\Lambda_n)}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (15)$$

где $\Delta(\Lambda_n)$ – определитель матрицы Λ_n , зависящий от всех интенсивностей $\lambda_{i,j}$, для которых $i \neq j$, $\Delta_i(\Lambda_n)$ является определителем $\Delta(\Lambda_n)$, в котором i -ый столбец заменяется на вектор e .

В дальнейшем понадобится следующее утверждение.

Теорема 1. Для значений $\pi_i^{(1)}$, $\pi_i^{(2)}$, указанных в оптимизационных задачах (9) и (10), выполняются соотношения:

$$\pi_i^{(1)} = \min \{ \pi_i(\Lambda) = \pi(\Lambda) \cdot q^{(i)} \mid \Lambda \in Z_0 \}, \quad (16)$$

$$\pi_i^{(2)} = \max \{ \pi_i(\Lambda) = \pi(\Lambda) \cdot q^{(i)} \mid \Lambda \in Z_0 \}, \quad (17)$$

где $Z_0 \subset Z$ и $Z_0 = \{ \Lambda \mid \lambda_{i,j} \in \{ \lambda_{i,j}^{(1)}, \lambda_{i,j}^{(2)} \}, j \neq i, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n \}$.

Доказательство. Из выражения (15) следует, что зависимость $\pi_i(\Lambda)$, $i = 1, \dots, n$ от каждой интенсивности $\lambda_{v,k}$, где $v \neq k$, $v = 1, \dots, n$, $k = 1, \dots, n$, можно представить в следующем виде (при остальных фиксированных интенсивностях):

$$\pi_i(\lambda_{v,k}) = \frac{a_i^{(1)} + a_i^{(2)} \cdot \lambda_{v,k}}{a_i^{(3)} + a_i^{(4)} \cdot \lambda_{v,k}} \quad \text{или} \\ \pi_i(\lambda_{v,k}) = \frac{a_i^{(1)}}{a_i^{(3)} + a_i^{(4)} \cdot \lambda_{v,k}}. \quad (18)$$

Из выражения (18) следует, что выполняются следующие неравенства:

$$\frac{\partial \pi_i(\lambda_{v,k})}{\partial \lambda_{v,k}} > 0, \quad \text{если } \omega_i > 0; \\ \frac{\partial \pi_i(\lambda_{v,k})}{\partial \lambda_{v,k}} = 0, \quad \text{если } \omega_i = 0; \\ \frac{\partial \pi_i(\lambda_{v,k})}{\partial \lambda_{v,k}} < 0, \quad \text{если } \omega_i < 0, \quad (19)$$

где $\omega_i = a_i^{(2)} \cdot a_i^{(3)} - a_i^{(1)} \cdot a_i^{(4)}$.

Из неравенств (19) следует, что $\pi_i(\lambda_{v,k})$, где $i = 1, \dots, n$, является монотонной функцией по аргументу $\lambda_{v,k}$, т.е. справедливы соотношения (16) и (17). Теорема доказана.

2.2. Алгоритмы нахождения величин $\pi_i^{(1)}, \pi_i^{(2)}, i = 1, \dots, n$.

Теорема 1 позволяет сформировать конечные множества $D_i, i = 1, \dots, n$ вида:

$$D_i = \left\{ \begin{array}{l} \lambda_i = (\lambda_{i,1}, \dots, \lambda_{i,n} | \lambda_{i,j} \in (\lambda_{i,j}^{(1)}, \lambda_{i,j}^{(2)}), \\ j \neq i, j = 1, \dots, n, \lambda_{i,i} = - \sum_{j=1, \dots, n, j \neq i}^n \lambda_{i,j} \end{array} \right\}. \quad (20)$$

Отметим, что любая матрица $\Lambda \in Z_0$ обладает свойством: i -ая строка λ_i этой матрицы принадлежит конечному множеству D_i , т.е. $\lambda_i \in D_i$, где $i = 1, \dots, n$.

Таким образом, задачи, представленные выражениями (16) и (17), являются частными случаями известных задач оптимального управления ОМП с доходом [5], которые решаются вычислительными процедурами с использованием множеств $D_i, i = 1, \dots, n$.

Теперь укажем алгоритмы решения задач, определяемые выражениями (16) и (17), а следовательно, и (9), (10).

В работе [5] приводится пошаговая процедура решения задачи оптимального управления ОМП с доходом. Эта процедура применительно к задаче (16) состоит из конечного числа циклов по $v = 1, \dots, n$, где на каждом v -ом цикле выполняется следующий пошаговый алгоритм, завершающихся за конечное число шагов k_v :

1. На k -ом шаге, используя матрицу $\Lambda(k) = \{\lambda_{i,j}^{(k)}\} \in Z_0$ и вектор $q^{(v)}$ (при $k = 0$ матрица $\Lambda(0)$ является любой матрицей из множества Z_0), решается следующая система линейных уравнений:

$$g^{(v)}(k) = q_i^{(v)} + \sum_{j=1}^n \lambda_{i,j}^{(v)}(k) \cdot w_j^{(v)}(k), i = 1, \dots, n, \quad (21)$$

в которой $g^{(v)}(k), w_j^{(v)}(k), j = 1, \dots, n-1$ являются неизвестными величинами, а $w_n^{(v)}(k) = 0$.

2. Для каждого i , где $i = 1, \dots, n$, определяется такая строка $\lambda_i(k+1)$, для которой выполняется соотношение:

$$f(\lambda_i(k+1)) = \min \{ q_i^{(v)} + \sum_{j=1}^n \lambda_{i,j}^{(v)}(k) \cdot w_j^{(v)}(k) | \lambda_i \in D_i \}. \quad (22)$$

При этом формируется матрица интенсивностей $\Lambda(k+1) \in Z_0$, в которой $\lambda_i(k+1), i = 1, \dots, n$ являются ее строками, и делается переход к п. 1 алгоритма, где $k=k+1$.

3. Действие алгоритма завершается на шаге k_v , при котором $g^{(v)}(k_v+1) = g^{(v)}(k_v)$. При этом, выполняется соотношение:

$$\pi_v^{(1)} = g^{(v)}(k_v). \quad (23)$$

Далее делается переход к следующему $(v+1)$ -ому циклу и осуществляется вышеприведенный алгоритм до тех пор, когда $(v+1)$ не будет равен n . Таким образом, вычисляется вектор $(\pi_1^{(1)}, \dots, \pi_n^{(1)})$.

Вектор $(\pi_1^{(2)}, \dots, \pi_n^{(2)})$ вычисляется также по приведенной процедуре, если в выражении (22) символ «min» заменить на «max».

2.3. Алгоритм решения задачи устойчивости.

Теперь перейдем к алгоритмам решения оптимизационных задач, представленных выражениями (7) и (8).

Эти задачи завершают решение задачи устойчивости показателя качества, представленного выражением (1). Задачи (7) и (8) представляют собой задачи линейного программирования, в которых ограничения являются симплексами. Поскольку симплексы в этих задачах имеют специфический вид, то для их решения можно применить упрощенный алгоритм, изложенный в работе [6]. Этот алгоритм не включает в себя процедуру нахождения обратных матриц, которая всегда присутствует в стандартном алгоритме решения задач линейного программирования.

Разработанные алгоритмы реализованы с помощью языка Python в виде программных модулей.

Результатом решения задач (6) и (7) являются векторы π^*, π^{**} и величины $Q(c, \pi^*), Q(c, \pi^{**})$.

Ниже приводится пример решения задачи устойчивости, иллюстрирующий применение изложенных алгоритмов.

Пусть имеется ОМП, которая характеризуется множеством состояний $J = \{1, 2, 3, 4\}$ и матрицей интенсивностей $\Lambda = \{\lambda_{ij}\}$. Интенсивности матрицы Λ имеют следующие интервальные оценки:

$$\begin{aligned} [\lambda_{1,2}^{(1)} = 1.2 \cdot 10^{-3}, \lambda_{1,2}^{(2)} = 8 \cdot 10^{-3}]; \\ [\lambda_{1,3}^{(1)} = 4 \cdot 10^{-2}, \lambda_{1,3}^{(2)} = 6 \cdot 10^{-2}]; \\ [\lambda_{1,4}^{(1)} = 8 \cdot 10^{-4}, \lambda_{1,4}^{(2)} = 1.2 \cdot 10^{-3}]; \\ [\lambda_{2,1}^{(1)} = 6.4 \cdot 10^{-2}, \lambda_{2,1}^{(2)} = 9.6 \cdot 10^{-2}]; \\ [\lambda_{2,3}^{(1)} = 8 \cdot 10^{-3}, \lambda_{2,3}^{(2)} = 1.2 \cdot 10^{-2}]; \\ [\lambda_{2,4}^{(1)} = 8 \cdot 10^{-4}, \lambda_{2,4}^{(2)} = 1.2 \cdot 10^{-3}]; \\ [\lambda_{3,1}^{(1)} = 8 \cdot 10^{-4}, \lambda_{3,1}^{(2)} = 1.2 \cdot 10^{-3}]; \\ [\lambda_{3,2}^{(1)} = 6 \cdot 10^{-2}, \lambda_{3,2}^{(2)} = 7 \cdot 10^{-2}]; \\ [\lambda_{3,4}^{(1)} = 7 \cdot 10^{-4}, \lambda_{3,4}^{(2)} = 10^{-3}]; \\ [\lambda_{4,1}^{(1)} = 6 \cdot 10^{-4}, \lambda_{4,1}^{(2)} = 10^{-3}]; \\ [\lambda_{4,2}^{(1)} = 5 \cdot 10^{-4}, \lambda_{4,2}^{(2)} = 8 \cdot 10^{-3}]; \\ [\lambda_{4,3}^{(1)} = 6 \cdot 10^{-2}, \lambda_{4,3}^{(2)} = 8 \cdot 10^{-2}]. \end{aligned}$$

«Веса» состояний:

$$c_1 = 10^2; c_2 = 5 \cdot 10^2; c_3 = 5 \cdot 10^3; c_4 = 10^4.$$

Размерность указанных интенсивностей – [1/час], «весов» – [денежная единица].

Расчеты, проведенные по указанным выше алгоритмам, дали следующий результат:

$$\begin{aligned} (\pi_1^{(1)} = 0,2974, \pi_2^{(1)} = 0,1927, \pi_3^{(1)} = 0,2711, \pi_4^{(1)} = 0,0085), \\ (\pi_1^{(2)} = 0,4828, \pi_2^{(2)} = 0,3455, \pi_3^{(2)} = 0,4061, \pi_4^{(2)} = 0,0184), \\ \pi^* = [0,2974 \quad 0,2781 \quad 0,4061 \quad 0,0184], \\ \pi^{**} = [0,4828 \quad 0,2376 \quad 0,2711 \quad 0,0085], \\ Q(c, \pi^*) = 2383,29 \text{ и } Q(c, \pi^{**}) = 1607,58. \end{aligned}$$

При этом коэффициент устойчивости, определенный выражением (11), примет следующее значение: $K \equiv (0,38; 0,3)$, т.е. при среднем относительном изменении интенсивностей на 30% линейная форма изменяется на 38%.

Заключение

В предлагаемой вычислительной процедуре решения задачи устойчивости возникает проблема, связанная с резким возрастанием погрешности в вычислениях финальных вероятностей по системе уравнений (14) при большом числе состояний ОМП и при большой разнице в значениях компонент матрицы интенсивностей. Эту проблему можно устранить использованием подхода, основанного на некоторых преобразованиях матрицы интенсивностей. Однако изложение этого подхода является предметом отдельной работы, которая выходит за рамки настоящей статьи.

Библиографический список

1. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2006. 699 с.
2. Сухарев М.Г., Карасевич А.Н. Технологический расчет и обеспечение надежности газо- и нефтепроводов. М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2000. 272 с.
3. Надежность систем энергетики и их оборудования. Справочник т. 3 «Надежность систем газо- и нефтепроводов», М.: ГУП «Нефть и газ», РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2000. 272 с.
4. Ливанов Ю.В. Задача управления технологической системой с учетом надежности. М.: Вычислительный центр АН СССР, 1987. 21 с.: ил.
5. Р. Ховард. Динамическое программирование и Марковские процессы. М.: Советское Радио, 1964. 189 с.
6. Карманов А.В., Орлова К.П. Алгоритм определения риска на опасных производственных объектах // Автоматизация и информатизация ТЭК. 2022. № 2(583). С. 36-40. DOI: 10.33285/2782-604X-2022-2(583)-36-40

References

1. Polovko A.M., Gurov S.V. [Foundations of the dependability theory]. Saint Petersburg: BHV-Peterburg; 2006. (in Russ.)
2. Sukharev M.G., Karasevich A.N. [Engineering simulation and assurance of reliability of gas and oil pipe lines]. Moscow: Gubkin University; 2000. (in Russ.)
3. [Reliability of power engineering systems and their equipment. A reference book, vol. 3, Reliability of gas and oil pipe line systems]. Moscow: GUP Neft i Gaz, Gubkin University; 2000. (in Russ.)
4. Livanov Yu.V. [The problem of controlling a process system taking reliability into consideration]. Moscow: USSR AS Computer Center; 1987. (in Russ.)
5. Howard R. Dynamic programming and Markov processes. Moscow: Sovetskoye Radio; 1964. (in Russ.)
6. Karmanov A.V., Orlova K.P. Risk determining algorithm at hazardous production facilities. Automation and Informatization of the fuel and energy complex 2022;2(583):36-40. DOI: 10.33285/2782-604X-2022-2(583)-36-40. (in Russ.)

Сведения об авторах

Карманов Анатолий Вячеславович – доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, профессор, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1, г. Москва, Российская Федерация, 119991, e-mail: ABKar2007@yandex.ru

Орлова Ксения Петровна – кандидат технических наук, доцент, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1, г. Москва, Российская Федерация, 119991, e-mail: sherksu@mail.ru

Серкин Владислав Евгеньевич – ассистент, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1, г. Москва, Российская Федерация, 119991, e-mail: serkin.ve@gmail.com

Токарев Максим Алексеевич – ассистент, Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина, проспект Ленинский, дом 65, корпус 1, г. Москва, Российская Федерация, 119991, e-mail: maxrus-121@mail.ru

About the authors

Anatoly V. Karmanov, Doctor of Physics and Mathematics, Senior Researcher, Professor, Gunkin University, 65, korp. 1 Leninsky prospekt, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: ABKar2007@yandex.ru.

Ksenia P. Orlova, Candidate of Engineering, Associate Professor, Gunkin University, 65, korp. 1 Leninsky prospekt, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: sherksu@mail.ru.

Vladislav E. Serkin, Assistant, Gunkin University, 65, korp. 1 Leninsky prospekt, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: serkin.ve@gmail.com.

Maksim A. Tokarev, Assistant, Gunkin University, 65, korp. 1 Leninsky prospekt, Moscow, 119991, Russian Federation, e-mail: maxrus-121@mail.ru.

Вклад авторов в статью

Карманов А.В. выполнил анализ литературы по теме исследования и сформировал задачу исследования.

Орлова К. П. предложила метод решения рассматриваемой задачи.

Серкин В.Е. и Токарев М. А. разработали алгоритм решения задачи и выполнили расчет примера.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Клиентоориентированные индексы и оценка надежности сложноразветвленной системы распределения электроэнергии¹

Customer Orientated Indices and Reliability Evaluation of Meshed Power Distribution System

Адितья Тивари

Aditya Tiwary

Кафедра противопожарной техники и безопасности, Академия IPS, Институт технических и естественных наук, Раджендра Нагар, Индаур (штат Мадхья-Прадеш), Индия

Dept. of Fire Technology & Safety Engineering, IPS Academy, Institute of Engineering and science, Rajendra Nagar, Indore (M.P), India

raditya2002@gmail.com



Адитья 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. В настоящей работе представлена оценка надежности сложноразветвленной распределительной системы. В работе также проводится оценка основных показателей, включая среднюю интенсивность отказов, среднее время отказа и среднее время отказа в год. Наряду с основными показателями оцениваются также такие клиентоориентированные показатели системы распределения электроэнергии, как индекс средней частоты прерываний энергоснабжения, индекс средней длительности прерываний энергоснабжения и индекс средней длительности прерывания энергоснабжения потребителя. В качестве примера системы распределения электроэнергии взята сложноразветвленная распределительная система.

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 time. The study of different reliability indices are very important considering the complex and uncertain nature of the power system. In this paper reliability evaluation of the meshed distribution system is presented. This paper also evaluates basic indices such as average failure rate, average outage time and average annual outage time. Along with basic indices, customer orientated indices such as system average interruption frequency index, system average interruption duration index and customer average interruption duration index of an electrical power distribution system is also evaluated. The electrical power distribution system taken for study is meshed distribution system in nature.

Ключевые слова: надежность; готовность; сложноразветвленная распределительная система; индекс средней частоты прерываний энергоснабжения; индекс средней длительности прерываний энергоснабжения системы.

Keywords: reliability; availability; meshed distribution system; average interruption frequency index; system average interruption duration index.

Для цитирования: Адитья Тивари. Клиентоориентированные индексы и оценка надежности сложноразветвленной системы распределения электроэнергии // Надежность. 2023. №4. С. 8-14. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-4-8-14>

For citation: Aditya Tiwary. Customer Orientated Indices and Reliability Evaluation of Meshed Power Distribution System. Dependability 2023;4:8-14. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-4-8-14>

Поступила: 27.02.2023 / **После доработки:** 03.10.2023 / **К печати:** 20.11.2023

Received on: 27.02.2023 / **Upon revision:** 03.10.2023 / **For printing:** 20.11.2023

¹ Оригинальная статья опубликована: Aditya Tiwary. "Customer Orientated Indices and Reliability Evaluation of Meshed Power Distribution System" Reliability: Theory & Applications, vol. 15, no. 1, 2020, pp. 10-19. doi:10.24411/1932-2321-2020-11001

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 ремонта. 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. Биллингтон 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 системой 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 Джайа 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. Шарма и др. [26] провели анализ надежности двух идентичных моделей систем с защитными и опасными отказами, переключающим устройством и перезагрузкой.

2. Оценка надежности системы распределения электроэнергии

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.

$$R(t) = \exp(-\lambda t), \quad (1)$$

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

Если принять надежность каждого компонента как $R_1, R_2, \dots, R_n$, то надежность последовательной системы (R_s) определяется как

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i, \quad (2)$$

где R_i – надежность i -го компонента, $i = 1 \dots n$.

Конфигурация системы будет представлять собой параллельную сеть надежности, при которой система отказывает, если отказывают все компоненты. Система выполняет свою функцию, даже если работает лишь один компонент.

Надежность параллельной системы (R_p) задается как

$$R_p = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i), \quad (3)$$

где R_i – надежность i -го компонента, $i = 1 \dots n$.

3. Оценка основных показателей надежности последовательной и параллельной систем

При проведении исследований надежности используются три основных параметра надежности: средняя интенсивность отказов, среднее время отказа и среднее (на один компонент) время отказа в год, которые далее рассматриваются применительно к последовательной системе:

$$\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i, \quad (4)$$

$$U_s = \sum_{i=1}^n (\lambda_i r_i), \quad (5)$$

$$r_s = \frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_i r_i)}{\sum_{i=1}^n (\lambda_i)}, \quad (6)$$

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

Для параллельной системы три основных показателя надежности могут быть оценены следующим образом¹:

$$\lambda_p = \frac{\lambda_1 \lambda_2 (r_1 + r_2)}{8760}, \quad (7)$$

$$r_p = \frac{r_1 r_2}{r_1 + r_2}, \quad (8)$$

$$U_p = \lambda_p r_p, \quad (9)$$

где λ_1, λ_2 – частота отказов в год первого и второго элементов системы соответственно; r_1, r_2 – среднее время восстановления в часах первого и второго элементов системы соответственно.

4. Оценка клиентоориентированных показателей

Клиентоориентированные показатели, связанные с исследованием надежности – это индекс средней ча-

стоты прерываний энергоснабжения, индекс средней длительности прерываний энергоснабжения и индекс средней длительности прерывания энергоснабжения потребителя, которые рассмотрены ниже.

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

$$SAIFI = \frac{\text{общее число прерываний энергоснабжения потребителя}}{\text{общее число обслуживаемых потребителей}} \quad (10)$$

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

$$SAIDI = \frac{\text{сумма продолжительностей прерывания энергоснабжения потребителя}}{\text{общее число потребителей}}. \quad (11)$$

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

$$CAIDI = \frac{\text{сумма продолжительностей прерывания энергоснабжения потребителя}}{\text{общее число прерываний энергоснабжения потребителя}}. \quad (12)$$

5. Результаты и обсуждение

Сложнозамкнутая распределительная система состоит из 18 распределительных сегментов и 4 точек нагрузки от LP-1 до LP-4 (рис. 1) [10].

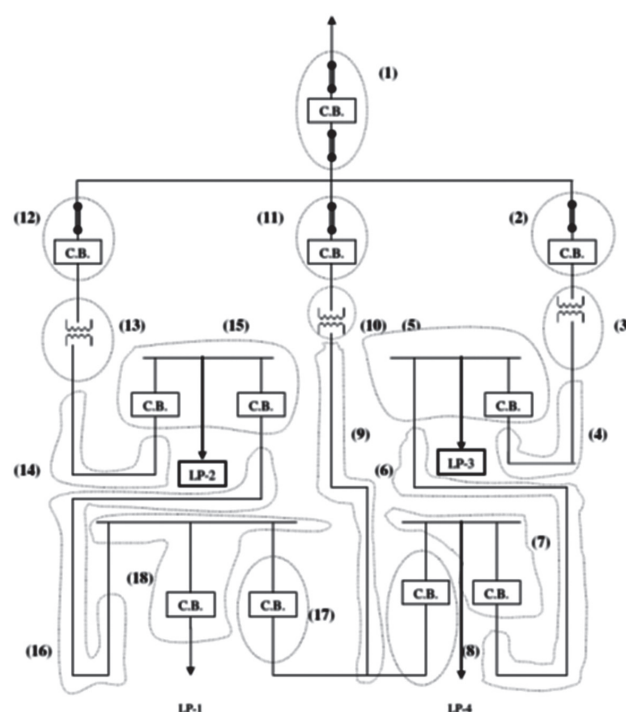


Рис. 1. Образец сложнозамкнутой распределительной системы

¹ Примечание переводчика: в случае размерности λ 1/ч в формуле (7) знаменатель принимается равным 1.

В табл. 1 [10] приведены исходные данные для сложноразветвленной распределительной системы. В табл. 1 приведена частота отказов в год и времена восстановления в часах для каждой распределительной секции от 1 до 18

Табл. 1. Системные данные для образца сложноразветвленной распределительной системы [10]

Распределительная секция, i	λ_i^0 , отказов в год	Среднее время восстановления, r_i^0 , ч
#1	0,310400	10,280412
#2	0,127600	5,010658
#3	0,070000	33,985714
#4	0,013520	14,335503
#5	0,084600	10,557447
#6	0,017640	13,555102
#7	0,008460	10,557447
#8	0,078000	11,023077
#9	0,008460	15,800000
#10	0,069000	27,565217
#11	0,155200	6,865979
#12	0,155200	6,865979
#13	0,070000	33,985714
#14	0,013520	14,335503
#15	0,156600	10,714943
#16	0,017640	13,555100
#17	0,078000	11,023077
#18	0,084600	10,557447

Табл. 2. Исходные данные для точек нагрузки

Точка нагрузки	1	2	3	4
Число клиентов	1000	800	600	700

Табл. 3. Оценка надежности на каждом распределительном участке

Распределительный участок	Надежность
1	0,7331
2	0,8802
3	0,9324
4	0,9866
5	0,9189
6	0,9825
7	0,9916
8	0,9250
9	0,9916
10	0,9333
11	0,8562
12	0,8562
13	0,9324
14	0,9866
15	0,8550
16	0,9825
17	0,9250
18	0,9189

сложноразветвленной распределительной системы. В табл. 2 приведены числа потребителей в каждой точке нагрузки с LP-1 по LP-4.

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. В табл. 4 приведено расчетное значение надежности в каждой точке нагрузки сложноразветвленной распределительной системы. Надежность в каждой точке нагрузки получена с помощью уравнений (2) и (3). На рис. 3 показана величина надежности в различных точках нагрузки распределительной системы.

Основные показатели надежности в каждой точке нагрузки, т.е. средняя интенсивность отказов, среднее время отказа и среднее время отказа в год, оценены и приведены в табл. 5. На рис. 4 показана величина средней интенсивности отказов в различных точках нагрузки

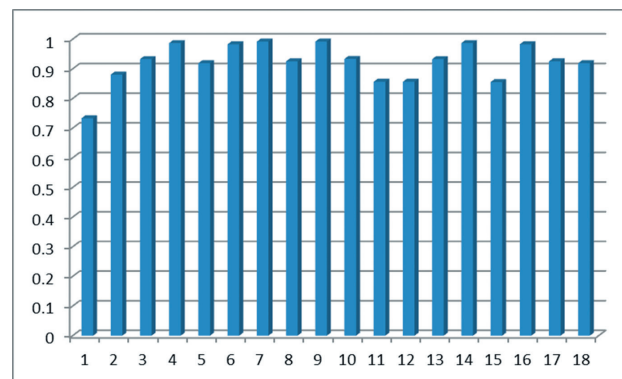


Рис. 2. Величина надежности для распределительных секций с 1 по 18.

Табл. 4. Оценка надежности в каждой точке нагрузки

Точка нагрузки	Надежность
1	0,6421
2	0,5973
3	0,6504
4	0,6958

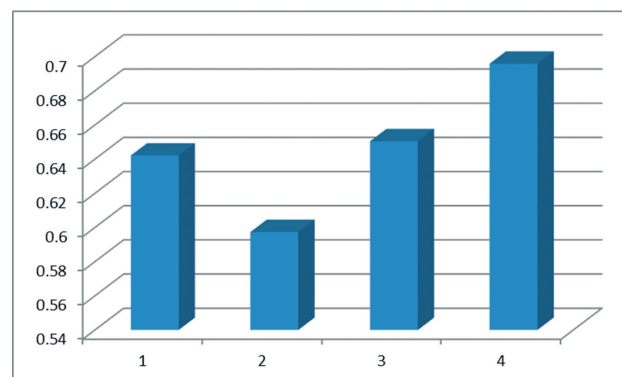


Рис. 3. Величина надежности в различных точках нагрузки с 1 по 4

Табл. 5. Оцененные основные показатели надежности в каждой точке нагрузки

Точка нагрузки	1	2	3	4
Средняя интенсивность отказов	0,3951	0,4671	0,3951	0,3189
Средняя длительность отказа	10,3384	10,4247	10,3381	10,2875
Средняя длительность отказов за год	4,0847	4,8697	4,0846	3,2807

распределительной системы. На рис. 5 и 6 показаны величины среднего времени отказа и среднего времени отказа в год в различных точках нагрузки сложноразветвленной распределительной системы.

Получены следующие значения клиентоориентированных показателей сложноразветвленной распределительной системы:

индекс средней частоты прерываний энергоснабжения (System average interruption frequency index, SAIFI) – 0,3965, индекс средней длительности прерываний энергоснабжения (System average interruption duration index, SAIDI) – 4,1057 и индекс средней длительности прерывания энергоснабжения потребителя (Customer average interruption duration index, CAIDI) – 10,3556.

6. Заключение

Оценка надежности системы распределения электроэнергии крайне важна. В настоящей работе рассматривается сложноразветвленная распределительная система. Расчету подлежит надежность каждой распределительной секции. Также определяется надежность каждой точки нагрузки сложноразветвленной распределительной системы. Для рассматриваемых точек нагрузки получены три основных параметра надежности: средняя интенсивность отказов, среднее время отказа и среднее время отказа в год. Также оцениваются такие важные клиентоориентированные показатели сложноразветвленной распределительной системы, как индекс средней частоты прерываний энергоснабжения, индекс средней длительности прерываний энергоснабжения и индекс средней длительности прерывания энергоснабжения 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, 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. 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.

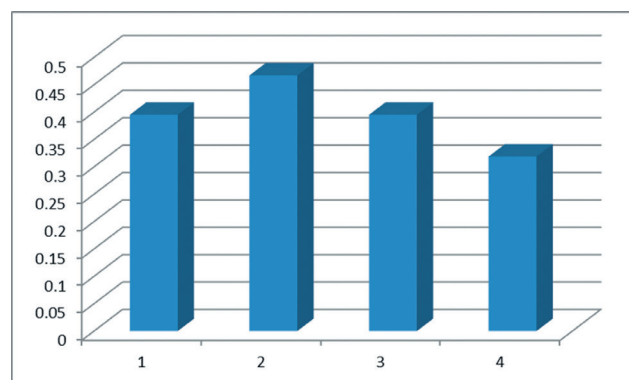


Рис. 4. Величина средней интенсивности отказов в различных точках нагрузки от 1 до 4

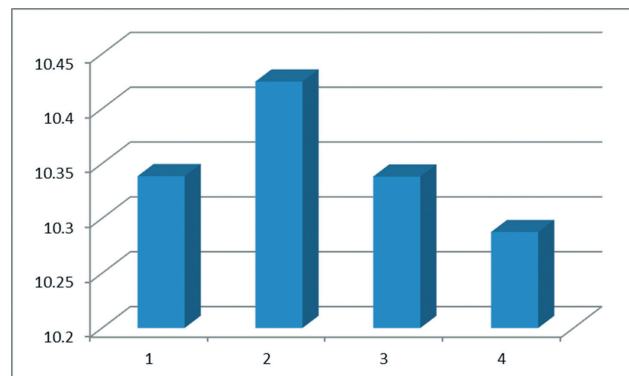


Рис. 5. Величина среднего времени отказа в различных точках нагрузки с 1 по 4

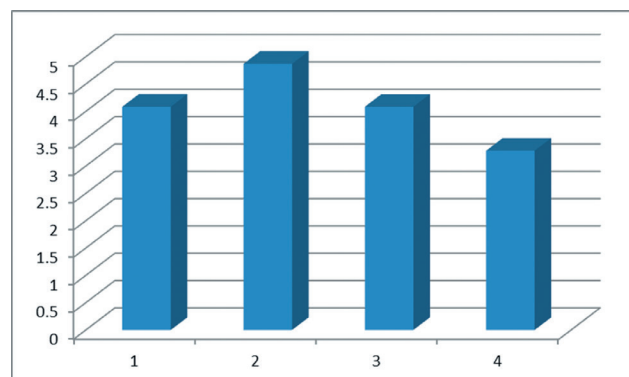


Рис. 6. Величина среднего времени отказов в год в различных точках нагрузки с 1 по 4

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. *IEE 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. 486-492.

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. Pp. 48-57.

16. Volkanavski A., Cepin M., Mavko B. Application of fault tree analysis for assessment of the power system reliability // *Reliab. Eng. Syst. Safety*. 2009. Vol. 94. Pp. 1116-1127.

17. Li B.M., Su C.T., Shen C.L. 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. et al. 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. No. 4(55). Pp. 9-13.

25. Uspensky M. Reliability assessment of the digital relay protection system // *Int. J. of Reliability: Theory and Applications*. 2019. Vol. 14. No. 3. Pp. 10-17.

26. Sharma A., Kumar P. Analysis of reliability measures of two identical unit system with on switching device and imperfect coverage. *Int. J. of Reliability: Theory and Applications*. 2019. Vol. 14. Pp. 44-52.

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. *IEE 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. Jirutitjaroen P., Singh C. Comparison of simulation methods for power system reliability indexes and their distribution. *IEEE Trans. Power Syst.* 2008;23:486-92.
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:48-57.
16. Volkanavski A., Cepin M., Mavko B. Application of fault tree analysis for assessment of the power system reliability. *Reliab. Eng. Syst. Safety* 2009;94:1116-1127.
17. Li B.M., Su C.T., Shen C.L. 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. et al. 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;4(55):9-13.
25. Uspensky M. Reliability assessment of the digital relay protection system. *Int. J. of Reliability: Theory and Applications* 2019;14(3):10-17.
26. Sharma A., Kumar P. Analysis of reliability measures of two identical unit system with on switching device and imperfect coverage. *Int. J. of Reliability: Theory and Applications* 2019;14:44-52.

Сведения об авторе

Адितья Тивари – доктор философии (PhD), доцент (Associate Professor) кафедры противопожарной техники и безопасности, Академия IPS, Институт технических и естественных наук, Раджендра Нагар, Индаур (штат Мадхья-Прадеш), Индия, e-mail: raditya2002@gmail.com

About the author

Aditya Tiwary, PhD, Associate Professor, Dept. of Fire Technology & Safety Engineering, IPS Academy, Institute of Engineering and science, Rajendra Nagar, Indore (M.P), India, e-mail: raditya2002@gmail.com

Вклад автора в статью

Адितья Тивари выполнил обзор библиографических источников, постановку задачи, анализ исходных данных и оценку основных показателей надежности сложной замкнутой системы распределения электроэнергии, включая клиентоориентированные показатели системы электроснабжения.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Инверсионный метод оценки меры согласованности мнений экспертов¹

Inversion method of consistency measure estimation expert opinions

Жигирев Н.Н.¹, Бочков А.В.^{2*}, Кузьминова А.В.³

Zhigirev N.N.¹, Bochkov A.V.^{2*}, Kuzminova A.V.³

¹KALABI IT, Москва, Российская Федерация, ²«НИИАС», Москва, Российская Федерация, ³Институт интеллектуальных кибернетических систем НИЯУ МИФИ, Москва, Российская Федерация

¹KALABI IT, Moscow, Russian Federation, ²JSC NIIS, Moscow, Russian Federation, ³Institute for Intelligent Cybernetic Systems NRNU MEPhI, Moscow, Russian Federation

*a.bochkov@gmail.com



Жигирев Н.Н.



Бочков А.В.



Кузьминова А.В.

Резюме. Цель. Проблема коллективного выбора – это проблема сведения нескольких индивидуальных мнений экспертов о порядке предпочтения сравниваемых объектов (альтернатив) в единое «групповое» предпочтение. Сложность коллективного выбора заключается в необходимости обработки рейтингов сравниваемых альтернатив, заданных разными экспертами в частных собственных шкалах. В статье представлен оригинальный авторский алгоритм обработки экспертных предпочтений в задаче коллективного выбора, основанный на понятии суммарной «ошибки» экспертов и измерения их вклада в коллективную меру их согласованности. Изложение материала включает необходимую теоретическую часть, состоящую из базовых определений и правил, постановку задачи и сам метод, основанный на правиле большинства, но в групповом порядке объектов.

Abstract. Aim. The problem of collective choice is the problem of combining several individual experts' opinions about the order of preference of objects (alternatives) being compared into a single "group" preference. The complexity of collective choice consists in the requirement of processing the ratings of the compared alternatives set by different experts in their own private scales. The paper presents an original algorithm for processing expert preferences in respect to the problem of collective choice based on the concept of the overall "error" of the experts and measuring their contribution to the collective measure of their consistency. The presented materials include the necessary theoretical part consisting of basic definitions and rules, the definition of the problem and the method itself that is based on the majority rule, but in the group order of objects.

Ключевые слова: коллективный выбор, перестановка, группа, несогласованность, инверсия, граф, рейтинг, метод Шульце, метод скейтинга, Парето-оптимальные решения.

Keywords: collective choice, permutation, group, inconsistency, inversion, graph, rating, Schulze method, skating method, Pareto-optimal solutions.

Для цитирования: Жигирев Н.Н., Бочков А.В., Кузьминова А.В. Инверсионный метод оценки меры согласованности мнений экспертов // Надежность. 2023. №4. С. 15-24. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-4-15-24>

For citation: Zhigirev N.N., Bochkov A.V., Kuzminova A.V. Inversion method of consistency measure estimation expert opinions. Dependability 2023;4:15-24. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-4-15-24>

Поступила: 29.03.2023 / **После доработки:** 02.10.2023 / **К печати:** 20.11.2023

Received on: 29.03.2023 / **Upon revision:** 02.10.2023 / **For printing:** 20.11.2023

¹ Оригинальная статья опубликована: A. Bochkov, N. Zhigirev, A. Kuzminova Inversion Method of Consistency Measure Estimation Expert Opinions // RT&A. 2022. №3 (69). doi:10.24412/1932-2321-2022-369-242-252. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/inversion-method-of-consistency-measure-estimation-expert-opinions> (дата обращения: 29.03.2023).

1. Введение

В практической деятельности эффективность принятия решений требует разработки и применения специализированного алгоритмического и методологического обеспечения. В случае участия в процессе поддержки принятия решений группы экспертов, возникает так называемая задача коллективного (группового) выбора. Существующие алгоритмы решения задач коллективного выбора [1-3] можно условно разделить на три класса.

Представителем первого класса является метод Шульце [4] (на основе доказательства теоремы Эрроу) с выбором Парето-оптимальных решений (исключением по Шварцу) от первого рейтинга к последнему, причем при отборе пересчитываются вновь критерии для следующего шага. Недостатком метода является довольно сложный алгоритм постоянного пересчета, существенно затрудняющий практическое использование метода.

К типичным представителям второго класса можно отнести хорошо зарекомендовавшую себя при проведении соревнований по спортивным балльным танцам скейтинг-систему [5]. Она проста в вычислительных расчетах и опирается на всем понятный так называемый мажоритарный принцип, принцип большинства. К сожалению, во многом именно эта простота может приводить к неустойчивым решениям, и, как следствие, невозможности распределить окончательные места среди участников соревнования в один тур, или признание ничьи между соперниками [6, 7].

Третий класс состоит из регрессионных моделей, типа нелинейного факторного анализа и других способах сжатия информации [8, 9], в которых искомое решение строится в виде задачи минимизации накопленных ошибок. Отличие методов третьего класса заключается в том, что они не ориентированы на выбор лидера в рейтингах, а определяются оптимумом, на который влияет весь объем данных.

Упомянутым методам решения задач коллективного выбора в целом присуща проблема согласования оценок экспертов при сравнении оцениваемых объектов.

В 1951 г. К. Эрроу сформулировал [10] теорему «О невозможности коллективного выбора в рамках ординалистского метода», математически обобщив парадокс Кондорсе [11]. Теорема утверждает, что в рамках этого подхода не существует метода объединения индивидуальных предпочтений для трех и более альтернатив, который удовлетворял бы некоторым вполне справедливым условиям (аксиомам выбора) и всегда давал бы логически непротиворечивый результат.

Когда на неопределенность самих объектов накладываются неоднозначные мнения экспертов, то предполагается некоторая иерархия в решении задачи выбора. Так, например, происходит в методе анализа иерархий [12], когда каждый из M экспертов имеет свое, отличное от других, мнение относительно весов рассматриваемых N объектов через коэффициенты матрицы предпочтений

$$(S_{ij}^m = \frac{W_j^m}{W_i^m} (i=1, \dots, N; j=1, \dots, N; i \neq j; m=1, \dots, M)).$$

Обычно веса усредняют и работают с обобщенной матрицей S_{ij} , что приводит, как правило, к нарушению основных аксиом «правильного» выбора (универсальность, полнота, монотонность, отсутствие диктатора, независимость), предложенных В. Парето [13, 14], Р. Кохом [15], Ч. Плоттом [16] и другими. Отказ от той или иной процедуры усреднения затрудняет задачу выбора и приводит, например, к необходимости решать проблему «слияния многомерных шкал» [17].

Ранее [18] авторами высказано утверждение, что экспертам для получения согласованных решений необходимо достичь консенсуса, по крайней мере с точностью до определения частных рейтингов в полном порядке следования объектов, и затем искать согласие в весовых коэффициентах между оказавшимися соседними ближайшими объектами, задающими, собственно, единую шкалу. В настоящей статье рассматривается метод, относящийся к третьему классу алгоритмов в теории принятия решений, направленный на поиск оптимума меры согласованности, восстановление полного коллективного порядка в предпочтениях на базе частных рейтингов экспертов.

2. Базовые определения и правила

Введем ряд базовых определений.

Определение 1. Произвольное взаимно однозначное отображение $g: X \leftrightarrow g(X)$ множества первых N натуральных чисел $X=1, 2, 3, \dots, N$ называется перестановкой -го порядка (перестановкой):

$$\begin{array}{ccccccc} X = & \{ & X_1=1 & & X_2=2 & & \dots & & x_N=N & \} \\ g: & \updownarrow & & \updownarrow & & \updownarrow & & \updownarrow & & \updownarrow \\ g(X) = & \{ & g_1=g(x_1) & & g_2=g(x_2) & & \dots & & g_N=g(x_N) & \} \end{array}$$

Множество $G=\{g\}$ образует группу размерности $N!$.

Определение 2. Обратная перестановка к g определяется как $(g^{-1}(j) = k) \Leftrightarrow (g(k) = j) \quad \forall j, k$.

Пример всех перестановок для $N=4$ приведен в табл. 1.

В принципе для любого N может быть каждой перестановке приписан индекс в лексикографическом порядке (ЛГ-порядке) значений $g(X)$ (столбцы 1, 2 в табл. 1).

Определение 3. Первую по индексу перестановку, которая равна единичной перестановке в группе $^1g=1234=E$, будем называть «истиной» или естественным порядком. Последнюю перестановку с ординатами в обратном порядке: $^{24}g = 4321 = \bar{E}$ – полной инверсией, которая находится на последнем определяемом уровне $N(N-1)/2$.

Определение 4. Для перестановки $g=g_1 g_2 g_3 \dots g_N$ пара индексов (g_i, g_j) называется инверсией [19], если $(i < j) \& (g_i > g_j)$.

Определение 5. Таблицей инверсий перестановки g называется последовательность чисел $\{b_1 b_2 \dots b_N\}$, где b_j – количество элементов больших j и расположенных левее j . Другими словами, b_j – число инверсий, у

Табл. 1. Полная таблица перестановок для $N=4$

Индекс g	Цифровой код g в ЛГ-порядке	Корневой синоним g	Синоним g , исходя из инверсий, [другие синонимы минимальной длины слова]	Уровень ошибки, длина слова	Обратная перестановка	Таблицы инверсий, их сумма, Σ				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	<1234>	E	E, [-]	0	<1234>	0	0	0	0	0
2	<1243>	c	c, [-]	1	<1243>	0	0	1	0	1
3	<1324>	b	b, [-]	1	<1324>	0	1	0	0	1
4	<1342>	cb	cb, [-]	2	<1423>	0	2	0	0	2
5	<1423>	bc	bc, [-]	2	<1342>	0	1	1	0	2
6	<1432>	bc b	cbc, [-]	3	<1432>	0	2	1	0	3
7	<2134>	a	a, [-]	1	<2134>	1	0	0	0	1
8	<2143>	ac	ac, [ca]	2	<2143>	1	0	1	0	2
9	<2314>	ba	ba, [-]	2	<3124>	2	0	0	0	2
10	<2341>	cba	cba, [-]	3	<4123>	3	0	0	0	3
11	<2413>	bac	bac, [bca]	3	<3142>	2	0	1	0	3
12	<2431>	bcba	cbac, [cbca]	4	<4132>	3	0	1	0	4
13	<3124>	ab	ab, [-]	2	<2314>	1	1	0	0	2
14	<3142>	acb	acb, [cab]	3	<2413>	1	2	0	0	3
15	<3214>	aba	bab, [-]	3	<3214>	2	1	0	0	3
16	<3241>	acba	cbab, [caba]	4	<2413>	3	1	0	0	4
17	<3412>	bacb	bacb, [bcab]	4	<3412>	2	2	0	0	4
18	<3421>	bacba	cbacb, [cbcab, bcbab, bcaba]	5	<4312>	3	2	0	0	5
19	<4123>	abc	abc, [-]	3	<2341>	1	1	1	0	3
20	<4132>	abcb	acbc, [cabc]	4	<2431>	1	2	1	0	4
21	<4213>	abac	babc, [abca]	4	<3241>	2	1	1	0	4
22	<4231>	abcba	cbabc, [acbca, cabca, cabac]	5	<4231>	3	1	1	0	5
23	<4312>	abacb	bacbc, [babcb, bcabc, abcab]	5	<3421>	2	2	1	0	5
24	<4321>	abacba	cbacbc, [cbcab, bcbabc, bcabac, bcabca, bacbac, bacbca, babcba, abcaba, abcbab, acbcab, acbacb, cabcab, cabacb]	6	<4321>	3	2	1	0	6

Табл. 2. Вершины 1-го уровня ошибок состоят из одного символа алфавита A

По порядку соседние от «истины» E	Уровень ошибки	Алфавит A	Вершина 1-го уровня ошибки – слово из одного символа A
	0		$E=E \times E$
1	1	a	$a=E \times a=2, 1, 3, 4, \dots, N-1, N$
2	1	b	$b=E \times b=1, 3, 2, 4, \dots, N-1, N$
3	1	c	$c=E \times c=1, 2, 4, 3, \dots, N-1, N$
...	1	...	...
$N-1$	1	z	$z=E \times z=1, 2, 4, 3, \dots, N, N-1$

z – условный символ $(N-1)$ образующей. Для $N=4$, $E \times AT(E) = \{a, b, c\}$, следовательно: $z=c$.

которых второй член равен j .

Определение 6. Для любой g имеется множество $AT(g)$ (англ., Adjacent Transposition) – «смежных, соседних» перестановок, количество которых равно $(N-1)$.

Все ребра $E \times AT(E)$ состоят из образующих элементов группы G . Элементы множества образующих $E \times AT(E)$ могут рассматриваться, как символы s некоторого алфавита A (табл. 2).

Определение 7. Взвешенный граф группы $V(G, G \times G)$ состоит из вершин G , а вес ребра $(g_1 \times g_2)$ равен s , когда $(g_2 \in AT(g_1)) \& (g_2 = g_1 s)$.

Структура графа $V(G, G \times G)$ определяется динамически, по уровням ошибок. На верхнем (нулевом) уровне находится только единичная перестановка E . На втором и последующих уровнях – только вершины, образованные присоединением только одного символа алфавита A .

Примечательно свойство четности перестановок: $aa=bb=cc=\dots=zz=E$, из-за которого граф группы может быть рассмотрен как неориентированный граф.

Определение 8. Каждый g можно интерпретировать как путь, или некоторую последовательность направленных отрезков графа V , и наоборот.

Путь из $v \in G$ в $v' \in G$ проходит через ребра, соединяющие соседние перестановки, и равен $v' = vs_1 \dots s_T$, где $s_1 \dots s_T$ – символы алфавита A , T – длина слова.

Определение 9. Множество всех конечных слов S над конечным алфавитом A счетно. Следовательно, каждому ненулевому слову может быть приписан индекс q .

$$S = \bigcup_{q=1}^{\infty} S^q, S^q = \prod_{t=1}^{T^q} s_t^q,$$

где T^q – количество символов в слове S^q .

Для каждого слова $S^q = \{s_1^q \dots s_{T^q}^q\}$ имеется одно обратное слово $S^{q*}: S^{q*} = \{s_1^{q*} = s_{T^q}^q; \dots; s_{T^q}^{q*} = s_1^q\}$.

Определение 10. Слова S^q и S^{k*} – являются синонимами, если $s_1^q \dots s_{T^q}^q \cdot s_1^{k*} \dots s_{T^{k*}}^{k*} = E$.

Определение 11. Среди одинаковых синонимов можно выделить конечное множество минимальных по длине слов T_{min} из вершины $g=v'$ в «истину» $E(v^{-1}=E)$: $g = v^{-1}v' = s_1 \dots s_T - (\text{synonym}(g))$.

Определение 12. Среди слов из $(\text{synonym}(g))$ существует «корневой синоним» с минимальной формой ЛГ-порядка на основе порядка элементов в A .

Корневой синоним – это слово, полученное из цифрового кода методом сортировки «всплывающего пузырька» [20] при движениях в сторону «истины» E . Иной способ получения корневых синонимов, представлен в табл. 3. Он исходит из метода последовательного уничтожения инверсий с последующим преобразованием череды синонимов от текущего синонима до корневого синонима с помощью образующих группу уравнений

(см. определение 13). У каждой перестановки g имеется ровно один корневой синоним длиной $T(g)$, совпадающей с динамически определяемым уровнем ошибок и суммарным количеством инверсий в таблице инверсий – Σ (табл. 3). В нашем случае для $\langle 4321 \rangle$ он равен слову из 6 символов «**abacba**».

При совпадении цифрового кода образуется сетевая структура графа V , когда соседние вершины оказываются на расстоянии единицы по уровню инверсии.

На рис. 1 изображена структура подобного графа V для $N=4$. Толстыми и тонкими ребрами изображены символы s , послыно участвующие в порождении новых соседних вершин. Содержание наполнения вершин – это изображение индекса перестановки g (столбец 1 в табл. 1), его цифровой код (столбец 2) и содержание корневого символа слова для перестановки g (столбец 3). Толстые линии графа V на рис. 1 соответствуют представлению его в качестве словаря корневых синонимов перестановки в виде остовного дерева графа V . Их направление совпадает с тем, есть ли на указанном месте инверсия (вверх) или нет (вниз). Шесть концевых вершин дерева изображены элементами с желтой заливкой, как, например, $\{\langle 19 \rangle; \langle 4123 \rangle; abc\}$. Подчеркнутая инверсия, для $\langle 19 \rangle$ только (a) приближает следующую вершину к «истине» E , снижая количество ошибок ровно на единицу.

Словарь корневых синонимов строится по следующему принципу: в циклах остаются только те связи между перестановками, которые старше по

Табл. 3. Алгоритмы построения синонимов различными методами

Метод последовательного снижения инверсий («первый» оптимальный по длине слова синоним)								Метод всплывающего пузырька (оптимальный по длине слова «корневой» синоним)							
Ошибка, уровень	Код	1	2	3	4		Σ	Ошибка, уровень	Код	1	2	3	4		Σ
6	4321	3	2	1	0	c	6	6	4321	3	2	1	0	a	6
5	4312	2	2	1	0	b	5	5	3421	3	2	0	0	b	5
4	4132	1	2	1	0	a	4	4	3241	3	1	0	0	a	4
3	1432	0	2	1	0	c	3	3	2341	3	0	0	0	c	3
2	1423	0	1	1	0	b	2	2	2314	2	0	0	0	b	2
1	1243	0	0	1	0	c	1	1	2134	1	0	0	0	a	1
0	1234	0	0	0	0		0	0	1234	0	0	0	0		0
							cbacbc								abacba

Табл. 4. Автоматическое построение КОУ на 1-2 уровне ошибок

		Второй аргумент								
		a	b	c	d	e	...	x	y	z
Первый аргумент	a	E		ac*	ad*	ae*	...	ax*	ay*	az*
	b		E		bd*	be*	...	bx*	by*	bz*
	c	ca		E		ce*	...	cx*	cy*	cz*
	d	da	db		E		...	dx*	dy*	dz*
	e	ea	eb	ec		E	...	ex*	ey*	ez*
	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	x	xa	xb	xc	xd	xe	...	E		xz*
	y	ya	yb	yc	yd	ye	...		E	
	z	za	zb	zc	zd	ze	...	zx		E

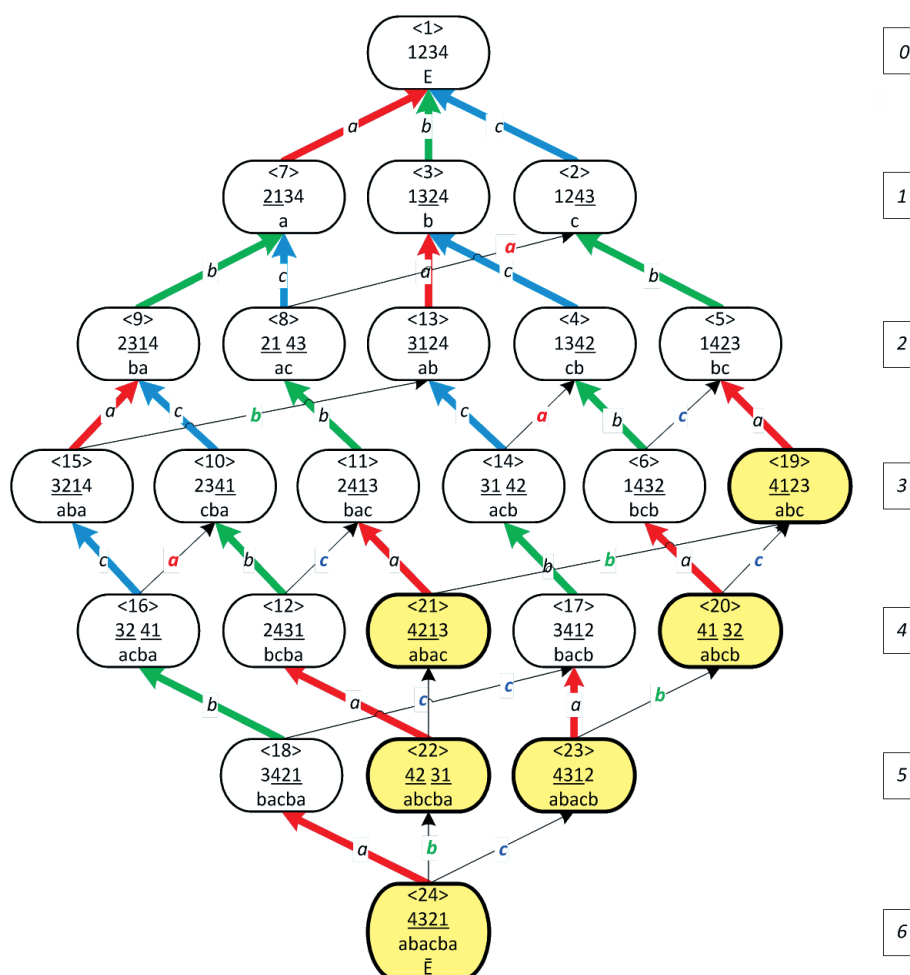
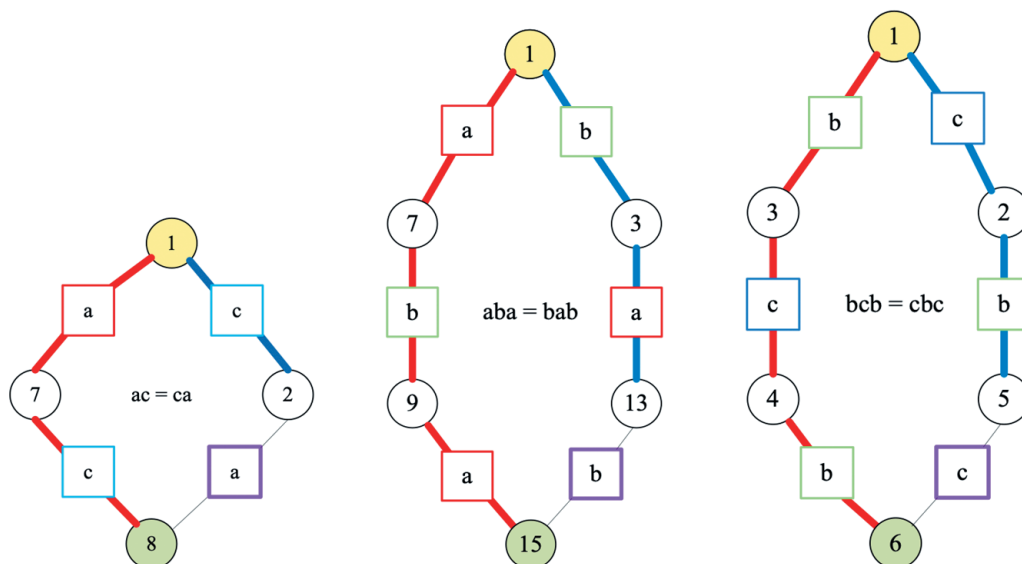
Рис. 1. Структура графа для $N=4$ 

Рис. 2. Иллюстрация разрыва циклов сети

ЛГ-порядку. Например, цикл $\langle 1 \rangle \langle 7 \rangle \langle 8 \rangle \langle 2 \rangle \langle 1 \rangle$ (а) разрываем по связи $\langle 2 \rangle \langle 8 \rangle$, поскольку связь $\langle 1 \rangle \langle 7 \rangle$ (рис. 2,а) по ЛГ-порядку меньше связи $\langle 1 \rangle \langle 2 \rangle (c)$.

Подобную операцию необходимо повторить для нижних участков циклов $\langle 6 \rangle$, $\langle 14 \rangle$, $\langle 15 \rangle$, $\langle 12 \rangle$, $\langle 16 \rangle$, $\langle 20 \rangle$, $\langle 21 \rangle$, $\langle 18 \rangle$, $\langle 22 \rangle$, $\langle 23 \rangle$ и дважды по $\langle 24 \rangle$, чтобы разрушить еще 12 циклов и сформировать дерево. Для

Табл. 5. Таблица поиска решений $P(g)$ с таблицей инверсий $B(g, P)$

ПРО	Arg E	1	...	n	...	N	ПНО	Arg E	1	...	k	...	N	Критерий несогласованности
ПРО	Func g	g_1	...	g_n	...	g_N	ПНО	Func p	g_1^{-1}	...	g_k^{-1}	...	g_N^{-1}	
ПНО	Arg E	1	...	k	...	N	ПНО	Arg E	1	...	k	...	N	
1	$p_1(g)$	p_{1,g_1}	...	p_{1,g_k}	...	p_{1,g_N}		$B_1(p_1(g))$	$B_{1,1}$	...	$B_{1,k}$	...	$B_{1,N}$	$K_1(g) = \sum_{k=1}^N B_{1,k}$
...	...	...	...	...	...	...			...	...	...	...	...	...
m	$p_m(g)$	p_{m,g_1}	...	p_{m,g_k}	...	p_{m,g_N}		$B_m(p_m(g))$	$B_{m,1}$	...	$B_{m,k}$	...	$B_{m,N}$	$K_m(g) = \sum_{k=1}^N B_{m,k}$
...	...	...	...	...	...	...			...	...	...	...	...	...
M	$p_M(g)$	p_{M,g_1}	...	p_{M,g_k}	...	p_{M,g_N}		$B_M(p_M(g))$	$B_{M,1}$	...	$B_{M,k}$	...	$B_{M,N}$	$K_M(g) = \sum_{k=1}^N B_{M,k}$
														$K(g) = \sum_{m=1}^M K_m(g)$

$N=4$ анализируя равенства, описывающие правую и левую ветви циклов, приходим к необходимости и достаточности шести равенств: $aa=E$, $bb=E$, $cc=E$, $ac=ca$ (рис. 2 а), $aba=bab$, $bc b=cbc$, (рис 2,б), которые нужны для построения синонимов слов в перестановках (табл. 1, столбцы 3, 4).

Для $N \geq 5$ подобный перебор связей затруднителен, поэтому разумно ввести понятие канонических образующих уравнений (КОУ).

Определение 13. Канонические образующие уравнения – необходимый и достаточный перечень уравнений, полностью задающий правила построения корневых и прочих синонимов через алфавит A .

Так, в табл. 3 возможно осуществить преобразования с помощью КОУ: «cbacbc» = «cbabcb» = «cabacsb» = «acbcab» = «abcbab» = «abcaba» = «abacba».

В табл. 4 приведены закономерности, учитывающие законы четности перестановок и ромбовидные замыкания на 2 уровне ошибок.

Знаком «*» в табл. 4 помечены необходимые обратные перестановки 2-го уровня инверсий. Например, если левая часть уравнений «ac» задает эквивалентную ей правую часть «ca» то надо заменить «ca» на «ac» и т.д. Добавляя соотношения третьего уровня инверсий: $aba=bab$; $bc b=cbc$; $cdc=cdc$; $ded=ede$; ..., $x y x=y x y$; $y z y=z y z$, определяем полный набор КОУ.

3. Постановка задачи

Рассмотрим N объектов сравнения $O_1, \dots, O_k, \dots, O_N$, индексы которых – первые N членов натурального ряда $E_{ПНО}=1, \dots, k, \dots, N$ – соответствуют порядку представления объектов на экспертизу. В экспертизе объектов участвуют M экспертов $\mathcal{E}_1, \dots, \mathcal{E}_m, \dots, \mathcal{E}_M$. Каждый из экспертов $\mathcal{E}_m$ имеет собственное представление о порядке размещения объектов $g_m = g_{m,1}, \dots, g_{m,n}, \dots, g_{m,N}$, индексы которых возрастают по мере убывания некоторого ка-

чества объектов с точки зрения эксперта. Значению $g_{m,1}$ соответствует индекс объекта O_{k_1} , участвующего в экспертизе с максимальным качеством по мнению эксперта $\mathcal{E}_m$, а $g_{m,N}$ – наихудший по качеству объект с индексом O_{k_N} :

$$G = (g_{m,n})_{m=1, \overline{M}}^{n=1, \overline{N}} = \begin{pmatrix} g_{1,1} & \dots & g_{1,N} \\ \dots & \ddots & \dots \\ g_{M,1} & \dots & g_{M,N} \end{pmatrix}.$$

Тем самым g_m – это перестановка рейтингов объектов (ПРО), аргументом которой является порядок $E_{ПРО}=1, \dots, n, \dots, N$.

Места $p_m = p_{m,1}, \dots, p_{m,k}, \dots, p_{m,N}$ по значениям обратные к ПРО g_m ($p_m = g_m^{-1}$) являются перестановками индексов объектов (ПНО) с аргументом $E_{ПНО}$:

$$P = (p_{m,n})_{m=1, \overline{M}}^{n=1, \overline{N}} = \begin{pmatrix} p_{1,1} = g_{1,1}^{-1} & \dots & p_{1,N} = g_{1,N}^{-1} \\ \dots & \ddots & \dots \\ p_{M,1} = g_{M,1}^{-1} & \dots & p_{M,N} = g_{M,N}^{-1} \end{pmatrix}.$$

Необходимо найти сжатие всех частных рейтинговых оценок ПРО $g_m (m=1, \dots, M)$ в виде ПРО $g_m^* = g_1^*, \dots, g_N^*$, которое бы уменьшило суммарную несогласованность экспертных оценок $g_{m,n} \rightarrow g_m^*$ (исходя из равноправия всех участников экспертизы), измеренную в инверсиях переходов от $g_{m,n}$ к g_m^* , то есть

$$K^* = \min K(g) = \min_{g_m} \left(\sum_{m=1}^M K_m(g_1, \dots, g_N) \right),$$

где $K_m(g_1, \dots, g_N)$ – сумма инверсий в оценках g_m -го эксперта, K^* – предельная мера несогласованности мнений экспертов.

Поиск оптимума в перестановках рейтингов объектов эквивалентен поиску перестановки индекса объектов p^* : $p^* = p_1^*, \dots, p_N^*$, поскольку $K(g_m^*) = K(p_m^*)$, где $p_m^* = (g_m^*)^{-1}$ (длины обратных путей ($E \rightarrow g$) совпадают с прямыми путями ($p = g^{-1} \rightarrow E$) при любом g) (табл. 5).

4. Описание метода

Эта задача относится к классу задач целочисленного программирования (на структуре в виде графа $V(G, G \times G)$ ПРО, расположенного по уровням ошибок).

Методы решения таких задач достаточно проработаны [21, 22], но ни один из них не гарантирует, что, начиная с какой-то перестановки, мы непременно попадем в глобальный минимум, который может оказаться не единственным. По крайней мере, что может дать гарантию – полный перебор всех ПРО. Такой вариант возможен для $N \leq 10$. Для каждого g считается $K(P_m, g)$ и сумма $K(g)$, а также производится «запоминание» текущего состояния множества глобальных минимумов.

Подмножество $g \in G$, для которых $K(g) = K^*$, назовем множеством глобальных минимумов – G^k . Поскольку M нечетное, то оно, как и множество локальных минимумов, состоит из изолированных решений (перестановок).

Рассмотрим пару $(l, l+1)$ столбцов в $P(g)$. $l=1, \dots, N-1$ соответствует символу s_l алфавита A (табл. 6).

Табл. 6. Таблица соседней пары $P(g)$

Эксперт	ПРО g	g_l	g_{l+1}
		1	$l+1$
1	$P_1(g)$	$P_{1,g_l}(E)$	$P_{1,g_{l+1}}(E)$
...		...	...
m	$P_m(g)$	$P_{m,g_l}(E)$	$P_{m,g_{l+1}}(E)$
...		...	...
M	$P_M(g)$	$P_{M,g_l}(E)$	$P_{M,g_{l+1}}(E)$

Правило 1. Если $P_m g_l(E) < P_m g_{l+1}(E)$, то сумма инверсий $K(g_m)$ увеличивается на 1, и если $P_m g_l(E) > P_m g_{l+1}(E)$, соответственно, уменьшается на 1.

Правило 2. Уменьшение и увеличение суммы зависит от количества строк, в которых второе условие M^2 (Правило 1) доминирует над первым условием M^1 . Соотношение $M^1 + M^2 = M$. Тогда сумма $K(g)$ от воздействия s_l уменьшится ровно на $M^2 - M^1$ единиц (при $M^2 > M/2$) или увеличится на $M^1 - M^2$ единиц (при $M^2 < M/2$).

Правило 3. «Условие отсечения». ПРО g принадлежит множеству локальных минимумов G^p , если для всех $j=1, \dots, N-1$ сумма ошибок только увеличивается

при вращении соседних столбцов по символу s_j . То есть $g \in G^p$ имеет соседние вершины графа V , превосходящие по сумме найденный локальный оптимум g не менее, чем на единицу.

Поиск G^p имеет смысл при больших N , но при малых N он тоже эффективен, поскольку уменьшение (увеличение) какой-то выделенной пары не зависит от места, на котором стоит пара, а только от содержимого полученных инверсий.

В зависимости от количества сравниваемых объектов (N) возможны 2 варианта дальнейших действий.

Вариант 1. «Прямой расчет». При малых N ($N \leq 6$) возможно создать «справочник» в ЛГ-порядке. Тогда для построения G^p и G^k следует из него исключить ПРО, в которых не выполняется «условие отсечения». Рассчитать для всех $g \in G^p$ значение $K(g)$ и выбрать оптимальное.

Поясним сказанное на примере для $N=4$ (табл. 7).

Создадим матрицу полных попарных сравнений столбцов для ПИО $P(E)$ для $(i=1, N; j=1, N; i \neq j)$ (табл. 8).

Табл. 8. Результаты подсчета инверсий по паре столбцов

$i \backslash j$	1	2	3	4
1	x	3	4	1
2	4	x	5	4
3	3	2	x	3
4	6	3	4	x

Фрагмент расчета для $(i=1; j=2, 3, 4)$ приведен в табл. 9.

Из табл. 8 видно, что «условию отсечения» не удовлетворяют 6 пар столбцов: $1 \rightarrow 3, 2 \rightarrow 1, 2 \rightarrow 3, 2 \rightarrow 4, 4 \rightarrow 1, 4 \rightarrow 3$.

Как видно, для $N=4$ справочник g (табл. 1) будет содержать 24 ПИО. На уровне инверсий (а) из 24 значений индексов будут отброшены (за счет «неправильных пар») 12 элементов с индексами (3-4, 7-12, 19-20, 23-24), на уровне (б) – 7 ПИО с индексами (1, 6, 15-17, 21-22), на уровне (с) – 4 ПИО с индексами (2, 5, 13, 18). В итоге G^p и G^k состоят из одной ПИО с индексом $^{14}g = g^* = 3142$, для которой мы далее произведем расчет значения оптимального критерия (табл. 10).

Табл. 7. Исходные данные $P(E)$ и расчет критерия оптимальности $K(E)$

	ПИО E	1	2	3	4	Таблицы инверсии				$K_m(E)$
		O_1	O_2	O_3	O_4	1→1	2→2	3→3	4→4	
$\mathcal{E}_1$	P_1	1	4	2	3	0	1	1	0	2
$\mathcal{E}_2$	P_2	2	3	1	4	2	0	0	0	2
$\mathcal{E}_3$	P_3	3	2	1	4	2	1	0	0	3
$\mathcal{E}_4$	P_4	4	2	3	1	3	1	1	0	4
$\mathcal{E}_5$	P_5	1	4	3	2	0	2	1	0	3
$\mathcal{E}_6$	P_6	2	4	1	3	2	0	1	0	3
$\mathcal{E}_7$	P_7	2	1	4	3	1	0	1	0	2

Критерий оптимальности $K(E)$: 20

Табл. 9. Проверка «условия отсечения» (суммы инверсий по столбцам ($i=1$))

1	→	2		1	→	3		1	→	4
1		4		1		2		1		3
2		3		2	1	1		2		4
3	1	2		3	1	1		3		4
4	1	2		4	1	3		4	1	1
1		4		1		3		1		2
2		4		2	1	1		2		3
2	1	1		2		4		2		3
	3				4				1	

Табл. 10. Оптимум ПРМ g^* и расчет критерия оптимальности $K(g^*)$

	ПРО g^*	3	1	4	2	Таблицы инверсии				$K_m(g^*)$
		O_3	O_1	O_4	O_2	1→1	2→2	3→3	4→4	
$\mathcal{E}_1$	P_1	2	1	3	4	1	0	0	0	1
$\mathcal{E}_2$	P_2	1	2	4	3	0	0	1	0	1
$\mathcal{E}_3$	P_3	1	3	4	2	0	2	0	0	2
$\mathcal{E}_4$	P_4	3	4	1	2	2	2	0	0	4
$\mathcal{E}_5$	P_5	3	1	2	4	1	1	0	0	2
$\mathcal{E}_6$	P_6	1	2	3	4	0	0	0	0	0
$\mathcal{E}_7$	P_7	4	2	3	1	3	1	1	0	5

Критерий оптимальности $K(g^*)$:

15

Табл. 11.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	g	${}^0g=E$	$K_m({}^0g)$	${}^1g=b$	$K_m({}^1g)$	${}^2g=ba$	$K_m({}^2g)$	${}^3g=bac$	$K_m({}^3g)$
		1234		1324		3124		3142	
$\mathcal{E}_1$	P_1	1423	2	1243	1	2143	2	2134	1
$\mathcal{E}_2$	P_2	2314	2	2134	1	1234	0	1243	1
$\mathcal{E}_3$	P_3	3214	3	3124	2	1324	1	1342	2
$\mathcal{E}_4$	P_4	4231	5	4321	6	3421	5	3412	4
$\mathcal{E}_5$	P_5	1432	3	1342	2	3142	3	3124	2
$\mathcal{E}_6$	P_6	2413	3	2143	2	1243	1	1234	0
$\mathcal{E}_7$	P_7	2143	2	2413	3	4213	4	4231	5
		$a=3; b=5; c=3$	20	$a=4; b=2; c=4$	17	$a=3; b=3; c=4$	16	$a=3; b=1; c=3$	15

Как видно из табл. 10, эксперт Э6 «угадал» оптимальное решение $K_6(g^*)=0$. Эксперты Э1 и Э2 совершили только по 1 ошибке, Э3 и Э5 – по две ошибки, а Э4 и Э7 – слишком много ошибок.

Далее необходимо по ПРО g^* восстановить оптимальную ПИО $p^*=(g^*)^{-1}$. Следовательно, искомые места $p^*(E)=2, 4, 1, 3$.

Вариант 2. «Итерации». В общем случае можно использовать правило отсечения непосредственно, начиная с какой-то стартовой ПИО, например с ${}^0g=E_{\text{пхо}}$. Полное отсутствие отсечения гарантирует, что локальный минимум найден в ${}^3g=bac$ (табл. 11).

Наличие в конце итерации ($a=4; b=2; c=4$) неоднозначности выбора заставляет вернуться к началу этого этапа и рассмотреть другую альтернативу ${}^{2+}g=bc$ с $K({}^{2+}g)=16$ и сделать вывод о прекращении поиска, поскольку ${}^{3+}g=bca$ с $K({}^{3+}g)=15$ является копией 3142 по КОУ.

5. Заключительные замечания

За пределами настоящей статьи оставлены вопросы, касающиеся сравнения предлагаемого метода с другими методами сжатия информации (например, с факторным анализом, с методом усреднения или с методом Шульце), которые будут обсуждены позже.

Дальнейшее развитие этого метода предполагает применение его в ранговых определениях, допускающих равенства оценок сравниваемых объектов при определении весовых коэффициентов сравниваемых объектов (аналогично попарным сравнениям в методе анализа иерархий [12] и решении задач слияния разнородных шкал [17, 18]).

Библиографический список

1. Кемени Дж., Снелл Дж. Кибернетическое моделирование. Некоторые приложения. М.: Советское радио, 1972. 192 с.

2. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в Волшебных странах: 2-е издание, переработанное и дополненное. М.: Логос, 2002. 382 с.
3. Каплинский А.И., Руссман И.Б., Умывакин В.М. Моделирование и алгоритмизация слабоформализованных задач выбора наилучших вариантов систем. Воронеж: Изд-во ВГУ, 1991. 168 с.
4. Schulze M. The Schulze Method of Voting. Computer Science and Game Theory. Cornell University, 2018. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1804/1804.02973.pdf> (дата обращения 29.09.2023).
5. Williams M. «The Skating System Study Guide». 2018. URL: <https://dancesport.org.au/scrutineering-tutorial-book-draft-12.3.pdf> (дата обращения: 02.10.2023).
6. Кондратенков В. Парадоксы, мифы и ошибки системы Скейтинг. Официальный сайт Московской Федерации Спортивного Танца. URL: <http://old.russianmaster.ru/html/skating/skatingparadox.html> (дата обращения: 02.10.2023).
7. Xavier Mora, The Skating System. 2nd edition. July 2001. URL: <https://mat.uab.cat/~xmora/escrutini/skating2en.pdf> (дата обращения 29.09.2023).
8. Лисицин Д.В. Методы построения регрессионных моделей. Новосибирск: НГТУ, 2011. 77 с.
9. Ким О. Дж., Мьюллер Ч.У., Клекка У.Р., и др. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / Под ред. И. С. Енюкова. М.: Финансы и статистика, 1989. 215 с.
10. Arrow K.J. Social Choice and Individual Values: 2nd ed. New York: Wiley, 1963.
11. Кондорсе Ж. Эскиз исторической картины прогресса человеческого разума. М.: Либроком, 2011. 280 с.
12. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. М. Радио и связь. 1993. 278 с.
13. Ногин В.Д. Множество и принцип Парето: 2-е изд., исправл. и доп. СПб: Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2022. 111 с.
14. Парето В. Учебник политической экономии. РИОР, 2018. 592 с.
15. Кох Р. Принцип 80/20. Эксмо, 2012. 443 с.
16. Miller R.M., Plott C.R., Smith V.L. Intertemporal Competitive Equilibrium: An Empirical Study of Speculation. Economics // Quarterly Journal of Economics. Vol. 91. Issue 4. 1977. Pp. 599-624. DOI: 10.2307/1885884
17. Bochkov A.V., Lesnykh V.V., Zhigirev N.N., Lavrukhin Yu.N. Some methodical aspects of critical infrastructure protection // Safety Science. 2015. Vol. 79. Pp. 229-242. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.06.008
18. Zhigirev N., Bochkov A., Kuzmina N. et al. Introducing a Novel Method for Smart Expansive Systems' Operation Risk Synthesis // Mathematics. 2022. Vol. 10. P. 427. DOI: 10.3390/math10030427
19. Кнут Д.Э. Искусство программирования. Том 3. Сортировка и поиск. The Art of Computer Programming. Volume 3. Sorting and Searching / под ред. В.Т. Тертышного (гл. 5) и И.В. Красикова (гл. 6): 2-е изд. М.: Вильямс, 2007. Т. 3. 832 с.
20. Левитин А.В. Метод грубой силы: Пузырьковая сортировка / В кн.: Алгоритмы. Введение в разработку и анализ. М.: Вильямс, 2006. С. 144-146.
21. Кофман А., Анри-Лабурдер А. Методы и модели исследования операций. Целочисленное программирование: Учебник. М.: Мир, 1977. 432 с.
22. Схрейвер А. Теория линейного и целочисленного программирования: Монография в 2-х томах: Пер. с англ. М.: Мир, 1991. Т. 1. 360 с.

References

1. Kemeny J., Snell J. Mathematical models in the social sciences. Moscow: Sovetskoe radio; 1972.
2. Larichev O.I. [Theory and methods of decision-making and Chronicle of events in magic lands: 2nd edition, revised and enlarged]. Moscow: Logos; 2002. (in Russ.)
3. Kaplinsky A.I., Russman I.B., Umyvakin V.M. [Simulation and algorithmisation of ill-defined problems of best system variants selection]. Voronezh: VSU Publishing; 1991. (in Russ.)
4. Schulze M. The Schulze method of voting. Computer science and game theory. Cornell University; 2018. (accessed 29.09.2023). Available at: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1804/1804.02973.pdf>.
5. Williams M. The Skating system study guide; 2018. (accessed 02.10.2023). Available at: <https://dancesport.org.au/scrutineering-tutorial-book-draft-12.3.pdf>.
6. Kondratenkov V. [Paradoxes, myths and errors of the Skating system]. Official website of the Moscow Federation of Sport Dance. (accessed 02.10.2023). Available at: <http://old.russianmaster.ru/html/skating/skatingparadox.html>.
7. Mora X. The Skating system. 2nd edition; 2001. (accessed 29.09.2023). Available at: <https://mat.uab.cat/~xmora/escrutini/skating2en.pdf>.
8. Lisitsyn D.V. [Methods of regression model construction]. Novosibirsk: NSTU; 2011. (in Russ.)
9. Kim O.J., Mueller C.U., Klekka U.R. et al. Yenyukov I.S., editor. [Factorial, discriminatory, and cluster analysis]. Moscow: Finansy i statistika; 1989.
10. Arrow K.J. Social choice and individual values: 2nd ed. New York: Wiley; 1963.
11. Condorcet J. Esquisse d'un tableau historique des progres de l'esprit humain. Moscow: Librokom; 2011.
12. Saaty T. Decision making – the analytic hierarchy and network. Moscow: Radio i sviaz; 1993.
13. Nugin V.D. [A set and the Pareto principle: 2nd edition, corrected and enlarged]. Saint Petersburg: [Publishing and Polygraphic Association of Higher Education Establishments]; 2022. (in Russ.)
14. Pareto V. Manual of political economy. RIOR; 2018.
15. Koch R. The 80/20 principle. Eksmo; 2012.
16. Miller R.M., Plott C.R., Smith V.L. Intertemporal competitive equilibrium: An empirical study of speculation. Economics. *Quarterly Journal of Economics* 1977;91(4):599-624. DOI: 10.2307/1885884.
17. Bochkov A.V., Lesnykh V.V., Zhigirev N.N., Lavrukhin Yu.N. Some methodical aspects of critical infrastructure protection. *Safety Science* 79;2015:229-242. DOI: 10.1016/j.ssci.2015.06.008.

18. Zhigirev N., Bochkov A., Kuzmina N. et al. A Novel method for smart expansive systems' operation risk synthesis. *Mathematics* 2022;10:427. DOI: 10.3390/math10030427.

19. Knuth D.E. The art of computer programming. Volume 3. Sorting and searching. Moscow: Viliams; 2007.

20. Levitin A.V. [The brute force method: Bubble sorting]. In: [Algorithms. Introduction into development and analysis]. Moscow: Viliams; 2006. (in Russ.)

21. Kaufmann A., Henry-Labodere A. Integer and mixed programming: Theory and applications. Moscow: Mir; 1977.

22. Schrijver A. Theory of linear and integer programming: a monograph in 2 volumes. Moscow: Mir; 1991.

Сведения об авторах

Жигирев Николай Николаевич – кандидат технических наук, главный научный сотрудник, KALABI IT, Москва, Российская Федерация, тел. +7 (985) 782-47-16, e-mail: nnzhigirev@mail.ru

Бочков Александр Владимирович – доктор технических наук, Ученый секретарь НТС АО «НИИАС», ул. Нижегородская, д. 27, стр. 1, Москва, Российская Федерация, 109029, e-mail: a.bochkov@gmail.com

Кузьминова Алла Владимировна – кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерных систем и технологий (№12), Институт интеллектуальных кибернетических систем НИЯУ МИФИ, Каширское ш., 31, Москва, Российская Федерация, 115409, тел. +7 (916) 494-08-77, e-mail: avkuzminova@mephi.ru

About the authors

Nikolai N. Zhigirev, Candidate of Engineering, Chief Researcher, KALABI IT, Moscow, Russian Federation, tel. +7 (985) 782-47-16, e-mail: nnzhigirev@mail.ru.

Alexander V. Bochkov, Doctor of Engineering, Academic Secretary of the Science and Technology Council, JSC NIIAS, 27, bldg 1 Nizhegorodskaya str., Moscow, 109029, e-mail: a.bochkov@gmail.com.

Alla V. Kuzminova, Candidate of Engineering, Senior Lecturer, Department of Computer Systems and Technologies (no. 12), Institute for Intelligent Cybernetic Systems NRNU MEPhI, 31 Kashirskoye sh., Moscow, 115409, Russian Federation, tel. +7 (916) 494 08 77, e-mail: avkuzminova@mephi.ru.

Вклад авторов в статью

Бочков А.В. выполнил постановку задачи, принял участие в разработке алгоритма инверсионного метода оценки меры согласованности мнений экспертов, провел модельные расчеты и сравнение разработанного алгоритма с традиционными, используемыми в настоящее время при решении задач группового выбора.

Жигирев Н.Н. является автором и основным разработчиком алгоритма инверсионного метода оценки меры согласованности мнений экспертов, направленного на поиск оптимума меры согласованности, восстановление полного коллективного порядка в предпочтениях на базе частных рейтингов экспертов.

Кузьминова А.В. выполнила анализ и обзор публикаций в рассматриваемой области исследования, включая задачи разработки эвристических алгоритмов «теории расписаний» и других задачах целочисленного линейного программирования, а также провела модельные расчеты контрольных примеров.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Сравнительный анализ методов оценки надежности по большим данным эксплуатации сложных систем

A comparative analysis of the methods of evaluating dependability using Big Data of complex system operation

Бурсиан Е.Ю.¹, Проурзин В.А.^{2*}, Проурзин О.В.¹

Bursian E.Yu.¹, Prouzsin V.A.^{2*}, Prouzsin O.V.¹

¹Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, Санкт-Петербург, ²Институт проблем машиноведения Российской Академии Наук, Российская Федерация, Санкт-Петербург

¹Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, Russian Federation, Saint Petersburg, ²Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, Saint Petersburg

*proursin@gmail.com



Бурсиан Е.Ю.



Проурзин В.А.



Проурзин О.В.

Резюме. Цель. Целью работы является исследование методов оценки показателей надежности на основе анализа больших данных, полученных в результате мониторинга эксплуатации технических систем и их комплектующих. Производится сравнительный анализ эффективности робастных статистических методов оценки показателей надежности сложных технических систем по данным их эксплуатации. **Методы.** В статье применяются методы математической статистики, а именно: робастные методы оценки параметра положения зашумленной выборки и численные методы статистического моделирования. Рассмотрены пять методов оценивания параметра положения (сдвига): выборочное среднее как неробастный метод, используемый для сравнения; выборочная медиана как простейший робастный метод оценки параметра положения; двухэтапная процедура оценивания с отсечением выбросов по правилу трех сигм; двухэтапная процедура оценивания с отсечением выбросов с использованием бокс-плота Тьюки; робастный метод Хьюбера. Сравнительный анализ методов оценки показателей надежности системы проводился путем статистического моделирования в пакете статистических вычислений R. Рассмотрено пять законов распределений для генерации выборок наработки до отказа и времени восстановления элементов: экспоненциальное распределение, распределение Вейбулла, логнормальное распределение, гамма-распределение и равномерное распределение. **Результаты.** Статистический анализ больших данных эксплуатации технических систем осложнен неоднородностью и зашумленностью этих данных, а также наличием ошибок и выбросов различной природы. В первую очередь это обусловлено различиями в нагрузках и условиях эксплуатации для каждого объекта. Здесь эта проблема рассмотрена применительно к задаче оценки показателей надежности структурно-сложной монотонной системы с независимым восстановлением элементов. Рассмотрены методы отбраковки аномальных данных и робастного оценивания параметра положения выборки и проведен сравнительный анализ эффективности этих методов для различных законов распределения. Показано, что робастные методы оценивания дают существенный выигрыш в точности по сравнению со стандартным выборочным средним. Наиболее эффективной показала себя двухэтапная процедура, основанная на отсечении выбросов с использованием боксплота Тьюки. **Выводы.** Результаты работы позволяют повысить точность оценки показателей надежности, основанной на использовании данных эксплуатации сложных технических систем. Они могут быть использованы в области обработки больших данных и теории надежности сложных систем.

Abstract. Aim. The paper aims to research the methods of evaluating dependability indicators based on the analysis of Big Data obtained in the course of monitoring the operation of technical systems and their components. A comparative analysis is performed of the efficiency of robust statistical methods of evaluating the dependability indicators of complex technical systems based on operation data. **Methods.** The paper uses methods of mathematical statistics, specifically robust methods of evaluating the translation parameter of a noisy sample and numerical methods of statistical modeling. The authors consider five methods of evaluating the translation parameter: sample mean as a nonrobust method used for comparison; sample median as the simplest robust method of evaluating the translation parameter; two-stage evaluation procedure with truncation of outliers according to the three sigma rule; two-stage evaluation procedure with truncation of outliers using Tukey's box-and-whisker plot; Huber's robust method. The comparative analysis of the methods of evaluating system dependability indicators was conducted by means of statistical modeling in the R statistical computation package. Five distribution laws for generating an element's time-to-failure and recovery time

samples were considered: exponential distribution, Weibull distribution, log-normal distribution, gamma distribution and uniform distribution. Results. Statistical analysis of Big Data associated with the operation of technical systems is complicated by the heterogeneity and noisiness of such data, as well as the presence of errors and outliers of varied nature. That is primarily due to the varied loads and operating conditions of each object. Herein this problem is examined as regards the problem of evaluating the dependability indicators of a structurally complex monotonic system with independent element recovery. The paper examines methods of rejecting anomalous data and robust evaluation of the sample position parameter and performs a comparative analysis of the efficiency of such methods for various distribution laws. It is shown that robust methods of evaluation enable significantly higher accuracy as compared to the standard sample mean. The two-stage procedure based on the truncation of outliers and Tukey's box-and-whisker plot proved to be the most efficient. Conclusions. The paper's findings allow improving the accuracy of evaluation of dependability indicators based on complex technical system operation data. They can be used in Big Data processing and complex system dependability theory.

Ключевые слова: большие данные, робастная оценка, статистическое моделирование, надежность, коэффициент готовности.

Keywords: Big Data, robust estimate, statistical modeling, dependability, availability factor.

Для цитирования: Бурсиан Е.Ю., Проурзин В.А., Проурзин О.В. Сравнительный анализ методов оценки надежности по большим данным эксплуатации сложных систем // Надежность. 2023. №4. С. 25-30. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-4-25-30>

For citation: Bursian E.Yu., Prourzin V.A., Prourzin O.V. A comparative analysis of the methods of evaluating dependability using Big Data of complex system operation. Dependability 2023;4:25-30. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-4-25-30>

Поступила: 08.06.2023 / **После доработки:** 28.09.2023 / **К печати:** 20.11.2023

Received on: 08.06.2023 / **Upon revision:** 28.09.2023 / **For printing:** 20.11.2023

Введение

Оценка показателей надежности технических систем путем проведения испытаний, как правило, требует больших затрат времени и характеризуется высокой стоимостью. Для сложных и уникальных объектов, объектов с редкими отказами, проведение испытаний на надежность может быть практически неосуществимым. С другой стороны, мониторинг эксплуатации существующих объектов позволяет собрать большую базу данных показателей надежности. Эти данные могут быть использованы в качестве исходных данных для оценки показателей надежности объекта. Подходы и методы работы с такими базами составляют содержание компьютерных технологий работы с большими данными. Основная сложность при анализе больших данных состоит в первую очередь в их разнообразии, изменчивости и недостоверности [1, 2, 3].

Известно, что наличие устойчивости частот (распределений) есть необходимое условие применения классических асимптотических методов математической статистики [4]. Однако при наблюдении больших данных могут меняться условия статистического эксперимента, вероятностные модели «дрейфуют», наблюдаться аномальные значения в данных. Таким образом, при анализе эксплуатационных данных надежности систем следует учитывать то, что значения получены при различных условиях эксплуатации и, соответственно, при различных законах распределений отказов и восстановлений, а также учитывать наличие недостоверных и аномальных данных.

Здесь будет рассмотрен достаточно распространенный случай, когда условия эксплуатации исследуемой технической системы изначально регламентированы. Тогда можно ожидать, что данные по отказам и восстановлению системы и ее узлов, полученные из различных источников, будут большей частью однородны по условиям эксплуатации. Однако при этом неизбежно появление некоторого объема данных, связанных с нестандартными условиями эксплуатации, ошибками и прочими аномалиями. Их наличие требует применения специальных методов отбраковки при анализе общей выборки. Этот случай рассмотрен при разработке методов оценки показателей надежности сложных систем с независимым восстановлением элементов.

При оценивании параметров распределений проблема аномальных данных в выборке имеет важное значение [5–8]. Наличие даже небольшого числа аномальных наблюдений может привести к оценкам, не соответствующим выборочным данным. В борьбе с грубыми погрешностями измерений, если они не были обнаружены в процессе измерений, используют два подхода:

- двухэтапная процедура с исключением аномальных данных и дальнейшая оценка по усеченной выборке [5, 6];
- робастные методы оценивания. В статистике под робастностью понимают нечувствительность к малым отклонениям выборки от предполагаемого закона распределения [7, 8].

Целью работы является исследование методов оценки показателей надежности на основе анализа больших данных, полученных в результате мониторинга экс-

плуатации технических систем и их комплектующих. Производится сравнительный анализ эффективности робастных статистических методов оценки показателей надежности сложных технических систем по данным их эксплуатации.

Задача оценки показателей надежности сложной системы по данным эксплуатации

Ставится задача оценки показателей надежности восстанавливаемых сложных систем по данным компьютерного мониторинга отказов и восстановлений эксплуатации элементов этой системы. Рассматривается случай, когда условия эксплуатации систем регламентированы, т.е. данные по надежности изделий, полученные из различных источников, большей частью будут сходны по условиям эксплуатации. При этом существенная доля выборки содержит данные, полученные при нестандартных условиях эксплуатации с повышенными или пониженными нагрузками, недостоверные данные, выбросы и прочие аномальные данные. Для статистического анализа таких выборок привлекаются методы, устойчивые (или, иначе, робастные) к наличию аномальных данных.

Рассматривается модель системы, состоящей из n узлов (элементов). Зависимость работоспособности системы от работоспособности ее элементов описывается монотонной структурной схемой работоспособности системы. Отказы и восстановления каждого элемента независимы и образуют альтернирующий процесс восстановления с некоторыми функциями распределения.

Отказ системы есть случайное событие, описываемое бинарной переменной X , которая принимает одно из двух значений – 0 (отказ) или 1 (работа). Это событие зависит от n простых независимых событий, описываемых бинарными переменными x_j (работа или отказ элемента). Вводится структурная логическая функция работоспособности системы, задающая зависимость состояния системы X от состояний ее элементов: $X = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Здесь рассматриваются системы с монотонными структурными функциями [9, 10, 11].

Пусть в результате мониторинга эксплуатации узлов системы получены данные о наработках до отказа и длительностях восстановлений каждого элемента системы. Законы распределений отказов и восстановлений, а также данные об эксплуатационных нагрузках неизвестны. Оцениваются коэффициент готовности K системы, средняя наработка между отказами системы T_C и среднее время восстановления системы T_R .

Коэффициент готовности j -го элемента не зависит от вида законов распределения отказов и восстановлений и равен [10]:

$$K_j = \frac{T_j}{T_j + S_j}. \quad (1)$$

Здесь T_j – среднее значение наработки до отказа, S_j – среднее время восстановления j -го элемента системы.

Пусть для каждого элемента монотонной системы с индивидуальным независимым восстановлением элементов известен коэффициент готовности K_j . Тогда [9]:

Коэффициент готовности K системы равен значению структурной функции от коэффициентов готовности элементов системы

$$X = \varphi(K_1, K_2, \dots, K_n). \quad (2)$$

Средняя наработка между отказами T_C системы вычисляется по формуле

$$T_C = \frac{K}{\lambda_C}, \quad (3)$$

где приведенная интенсивность отказов системы:

$$\lambda_C = \sum_{j=1}^n \frac{1}{T_j + S_j} (\varphi|_{K_j=1} - \varphi|_{K_j=0}).$$

3. Среднее время восстановления системы:

$$T_R = \frac{1 - K}{\lambda_C}. \quad (4)$$

Итак, оценка показателей надежности монотонных систем с независимым восстановлением элементов сводится к оценке коэффициентов готовности (1) каждого элемента, которые в свою очередь сводятся к оценке среднего значения T_j наработки до отказа и среднего времени S_j восстановления каждого элемента системы. Тем самым основная проблема оценки показателей надежности по полученным выборкам времени отказов и восстановлений каждого элемента системы состоит в адекватной оценке среднего значения (параметра положения) каждой выборки.

Методы робастной оценки параметра положения

Пусть имеется некоторая выборка $\{t_i\}$, $i = 1, \dots, N$. Рассмотрим задачу оценивания параметра положения T этой выборки. В условиях наличия выбросов и аномальных данных оценка параметра положения выборки, произведенная с помощью среднего арифметического, является неустойчивой. Для решения этой проблемы используют процедуры отбраковки аномальных данных и методы робастного оценивания параметра положения выборки [5–8]. Здесь сравниваются пять методов оценки параметра положения.

1. Выборочное среднее или среднее арифметическое выборки: $T = 1/N \sum_{i=1}^N t_i$. Этот простой метод неустойчив к выбросам и аномальным данным. Он здесь применяется для сравнительного анализа.

2. Выборочная медиана. Это простой робастный метод, нечувствительный к выбросам. Выборочная медиана является состоятельной и несмещенной оценкой среднего значения.

3. Двухэтапная процедура оценивания с отсечением выбросов по правилу трех сигм; Двухэтапная робастная процедура оценивания состоит из двух шагов. На первом шаге находятся и удаляются выбросы. На втором шаге вычисляется выборочное среднее усеченной выборки.

4. Двухэтапная процедура оценивания с отсечением выбросов с использованием бокс-плота Тьюки (иначе еще называемого «ящиком с усами») [3, 6].

5. Робастный метод Хубера [3, 7].

Ставится задача сравнения этих методов оценки параметра положения зашумленной выборки и оценки их эффективности.

Сравнительный анализ методов

Статистический эксперимент состоит в следующем. Пусть требуется оценить среднюю наработку до отказа некоторого изделия. Методом статистического моделирования генерируется выборка случайных наработок изделия, задаваемая смесью трех распределений. Большая часть выборки (70%) сгенерирована по основному закону распределения, характеризующему регламентированный режим работы. Еще 15% данных, сгенерированных по закону распределения, сдвинутому влево, характеризуют наработку при повышенных нагрузках. Оставшиеся 15% данных, сдвинутых вправо, характеризуют наработку при заниженных нагрузках. Кроме этого, добавлено небольшое количество грубых выбросов. Задача состоит в оценке средней наработки, соответствующей основному режиму работы. Задача решается перечисленными выше пятью методами и результаты сравниваются с точным значением.

Выборка включает в себя 70 000 точек, распределенных по основному закону со средним значением T_0 . К ним примешивается 14 900 точек, распределенных по этому же закону со средним $3T_0$ (пониженная нагрузка) и 14 900 точек, распределенных по этому же закону со средним $T_0/3$ (повышенная нагрузка). Кроме того, к выборке примешано 200 случайных выбросов, распределенных равномерно на интервале от 0 до $1000T_0$. Рассмотрено пять основных законов распределений: экспоненциальное распределение, распределение Вейбулла, логнормальное распределение, гамма-распределение и равномерное распределение. Коэффициент вариации всех распределений, за исключением экспоненциального, положен равным 0,5.

Статистическое моделирование производилось в пакете статистических вычислений R. Вычислялась оценка параметра положения T пятью методами, перечисленными выше, и вычислялась относительная ошибка $\frac{|T - T_0|}{T_0} 100\%$. Результаты сведены в табл. 1.

Простое среднее арифметическое дает неприемлемую оценку, более чем в два раза превышающую точное значение. Оценка среднего медианой дает в целом хорошие результаты, за исключением оценки выборки, распреде-

ленной по экспоненциальному закону, который характеризуется максимальной асимметрией. Три оставшихся робастных метода дают оценку, ошибка которой не превышает 24% для всех распределений. Наиболее точные оценки (ошибка менее 15%) дает двухэтапная процедура, основанная на отбраковке с помощью боксплота Тьюки.

3.1. Пример оценки показателей надежности мостиковой схемы.

Рассматривается пример системы с независимым восстановлением элементов, состоящей из пяти одинаковых элементов ($n = 5$). Структурная схема работоспособности задается мостиковой схемой (рис. 1).

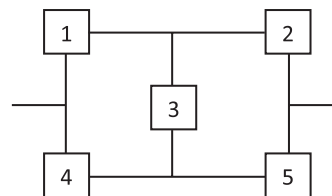


Рис. 1. Мостиковая структурная схема работоспособности системы

Структурная логическая функция мостиковой схемы имеет вид [12]:

$$X = 2x_1x_2x_3x_4x_5 - x_2x_3x_4x_5 - x_1x_3x_4x_5 - x_1x_2x_4x_5 - x_1x_2x_3x_5 - x_1x_2x_3x_4 + x_1x_3x_5 + x_2x_3x_4 + x_1x_4 + x_2x_5.$$

Средняя наработка до отказа одного элемента положена равной $T_0 = 10\,000$ ч, среднее время восстановления элемента после отказа равно $S_0 = 250$ ч. Расчеты по формулам (1)–(4) дают следующие значения показателей надежности. Коэффициент готовности каждого элемента $K_0 = \frac{T_0}{T_0 + S_0} = 0,97561$. Коэффициент готовности системы равен $K = 2K_0^5 - 5K_0^4 + 2K_0^3 + 2K_0^2 = 0,99878$. Приведенная интенсивность отказов системы: $\lambda_c = \frac{1}{T_0 + S_0} (10K_0^4 - 20K_0^3 + 6K_0^2 + 4K_0) = 9,8384 \times 10^{-6}$. Средняя наработка системы между отказами $T_c = 101\,519$ ч. Среднее время восстановления системы $T_r = 123,7$ ч.

Формируются выборки наработок и времени восстановления элементов как данные, полученные из истории эксплуатации этих элементов и их аналогов. Обе выборки формируются аналогично описанному выше численному эксперименту. Рассматривается

Табл. 1. Сравнение эффективности различных методов оценки параметра положения

Распределение	Относительная ошибка метода, %				
	Среднее арифметическое	Медиана	Правило 3-х сигм	Боксплот Тьюки	Метод Хубера
Экспоненциальное	119,9	32,6	21,0	14,9	23,8
Нормальное	119,5	2,7	20,6	5,1	23,5
Логнормальное	119,3	10,9	20,4	4,7	23,3
Равномерное	119,1	3,9	20,3	4,2	23,5
Вейбулла	119,7	6,4	20,8	3,9	23,7
Гамма	119,2	8,9	20,4	3,8	23,3

Табл. 2. Сравнение эффективности методов оценки показателей надежности на примере мостиковой схемы

Метод	Оценка параметра/Относительная погрешность[%]					
	T_0	S_0	K_0	K	T_c	T_R
Среднее арифметическое	$\frac{21972}{120}$	$\frac{547}{119}$	$\frac{0,97571}{0,01}$	$\frac{0,99879}{0,001}$	$\frac{223967}{121}$	$\frac{271}{119}$
Медиана	$\frac{8964}{10,4}$	$\frac{167}{33,6}$	$\frac{0,98166}{0,62}$	$\frac{0,99932}{0,05}$	$\frac{121268}{19,4}$	$\frac{83}{32,9}$
Правило 3 сигм	$\frac{12029}{20,3}$	$\frac{299}{19,8}$	$\frac{0,97571}{0,01}$	$\frac{0,99879}{0,001}$	$\frac{122632}{20,8}$	$\frac{148}{19,8}$
Боксплот Тьюки	$\frac{9549}{4,5}$	$\frac{211}{15,4}$	$\frac{0,97833}{0,28}$	$\frac{0,99904}{0,03}$	$\frac{109199}{7,6}$	$\frac{104}{15,3}$
Метод Хубера	$\frac{12342}{23,4}$	$\frac{307}{22,9}$	$\frac{0,97571}{0,01}$	$\frac{0,99879}{0,001}$	$\frac{125805}{23,9}$	$\frac{152}{22,9}$
Точное значение	10000	250	0,97561	0,99878	101519	123,7

случай, при котором отказы при регламентированных нагрузках распределены по логнормальному закону со средним T_0 и коэффициентом вариации 0,5. По этому закону генерируется 70 000 отсчетов. К ним примешивается 14 900 точек, распределенных по тому же закону со средним $3T_0$ (пониженная нагрузка) и 14 900 точек, распределенных по тому же закону со средним $\frac{1}{3}T_0$ (повышенная нагрузка). Кроме того, в выборку добавлено 200 случайных выбросов, распределенных равномерно на интервале от 0 до $1000T_0$.

Для интервалов восстановления при штатной ситуации принят экспоненциальный закон распределения со средним S_0 , по которому сгенерировано 70 000 точек. К ним примешивается 14 900 точек, распределенных по тому же закону со средним $3S_0$ и 14 900 точек, распределенных по тому же закону со средним $\frac{1}{3}S_0$. Кроме того, в выборку добавлено 200 случайных выбросов, распределенных равномерно на интервале от 0 до $1000S_0$.

Результаты расчетов сведены в табл. 2. Наиболее точные оценки дает двухэтапная процедура, основанная на отбраковке с помощью боксплота Тьюки. Заметим, что коэффициенты готовности элемента и системы весьма устойчивы к наличию аномальных данных в выборке.

Заключение

Осуществление компьютерного мониторинга эксплуатации технических систем позволяет собрать данные о надежности этих систем и их компонентов. Эти данные могут быть использованы для оценки показателей надежности системы. Следует учитывать, что статистический анализ данных по надежности технических систем осложнен неоднородностью и зашумленностью этих данных, а также наличием ошибок и выбросов различной природы. В первую очередь это обусловлено различиями в нагрузках и условиях эксплуатации для каждого объекта. Здесь эта проблема рассмотрена применительно к задаче оценки показателей надежности структурно-сложной монотонной системы с независимым восстановлением элементов.

Показано, что основная проблема оценки показателей надежности по полученным выборкам времени отказов и восстановлений каждого элемента системы состоит в адекватной оценке среднего значения (параметра положения) каждой выборки.

Рассмотрены методы отбраковки аномальных данных и робастного оценивания параметра положения выборки и проведен сравнительный анализ эффективности этих методов для различных законов распределения. Показано, что робастные методы оценивания дают существенный выигрыш в точности по сравнению со стандартным выборочным средним. Наиболее эффективной показала себя двухэтапная процедура, основанная на отсеке выбросов с использованием боксплота Тьюки. Результаты работы позволяют повысить точность оценки показателей надежности, основанной на использовании данных эксплуатации сложных технических систем.

Библиографический список

1. Leskovec J., Rajaraman A., Ullman J.D. Mining of massive data sets. Cambridge: Cambridge university press, 2020. 498 p. DOI: 10.1017/9781108684163
2. Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б., Семенова М.А. К вопросу статистического анализа больших данных // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2018. № 44. с. 40-49. DOI: 10.17223/19988605/44/5
3. Проурзин В.А., Проурзин О.В. Методы анализа больших данных надежности восстанавливаемых систем // Интеллектуальные технологии на транспорте. 2022. № 1(29). С. 34-38. DOI: 10.24412/2413-2527-2022-129-34-38
4. Крамер Г. Математические методы статистики. М.: Мир, 1975. 648 с.
5. Barnett V., Lewis T. Outliers in Statistical Data. New York: Wiley, 1994. 424 p.
6. Tukey D. A survey of sample from contaminated distribution / In: Contribution to Probability and Statistics, ed. I Olkin. Stanford: Stanford Univ. Press, 1960. Pp. 446-486.
7. Хьюбер П. Робастность в статистике. М.: Мир, 1984. 304 с.

8. Shevlyakov G.L., Vilchevski N.O. Robustness in Data Analysis: Criteria and Methods. Berlin, Boston: De Gruyter, 2001. 320 p. DOI: 10.1515/9783110936001

9. Байхельт Ф., Франкен П.М. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. М.: Радио и связь, 1988. 392 с.

10. Рябинин И.А., Черкесов Г.Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем. М.: Радио и связь, 1981. 264 с.

11. Prouzsin V.A. Techno-Economic Risk in Designing Complex Systems: Algorithms for Analysis and Optimization // Automation and Remote Control. 2003. Vol. 64. No. 7. Pp. 1054-1062. DOI: 10.1023/A:1024773916089

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

References

1. Leskovec J., Rajaraman A., Ullman J.D. Mining of massive data sets. Cambridge: Cambridge university press; 2020. DOI: 10.1017/9781108684163.

2. Lemesko B.Yu., Lemesko S.B., Semionova M.A. [On the statistical analysis of big data]. [*Herald of the Tomsk State University. Control, computer technology and information science*] 2018;44:40-49. DOI: 10.17223/19988605/44/5. (in Russ.)

3. Prouzsin V.A., Prouzsin O.V. Methods for Big Data analysis of reliability of recoverable systems. *Intellectual Technologies on Transport* 2022;1(29):34-38. DOI: 10.24412/2413-2527-2022-129-34-38. (in Russ.)

4. Cramer H. Mathematical methods of statistics. Moscow: Mir; 1975.

5. Barnett V., Lewis T. Outliers in Statistical Data. New York: Wiley; 1994.

6. Tukey D. A survey of sample from contaminated distribution. In: Olkin I., editor. Contribution to Probability and Statistics. Stanford: Stanford Univ. Press; 1960. P. 446-486.

7. Huber P. Robust statistics. Moscow: Mir; 1984.

8. Shevlyakov G.L., Vilchevski N.O. Robustness in Data Analysis: Criteria and Methods. Berlin, Boston: De Gruyter; 2001. DOI: 10.1515/9783110936001.

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

10. Riabinin I.A., Cherkesov G.N. [Logical and probabilistic methods of dependability study of structurally complex systems]. Moscow: Radio i sviaz; 1981. (in Russ.)

11. Prouzsin V.A. Techno-economic risk in designing complex systems: algorithms for analysis and optimization. *Automation and Remote Control* 2003;64(7):1054-1062. DOI: 10.1023/A:1024773916089.

12. Dhillon B., Singh C. Engineering reliability. Moscow: Mir; 1984.

Сведения об авторах

Бурсиан Елена Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, Московский пр.,

д. 9, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 190031, e-mail: bursianeu@mail.ru

Проурзин Владимир Афанасьевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории «Методов анализа надежности», Институт проблем машиноведения Российской Академии Наук, Большой пр. В.О., д.61, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 199178, e-mail: proursin@gmail.com

Проурзин Олег Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Информационные и вычислительные системы» Петербургского государственного университета путей сообщения Императора Александра I, Московский пр., д. 9, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 190031, e-mail: pvo777@yandex.ru

About the authors

Elena Yu. Bursian, Candidate of Engineering, Associate Professor, Department of Advanced Mathematics, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation, e-mail: bursianeu@mail.ru.

Vladimir A. Prouzsin, Candidate of Physics and Mathematics, Senior Researcher, Laboratory of Methods of Reliability Analysis, Institute for Problems in Mechanical Engineering of the Russian Academy of Sciences, 61 Bol'shoy prospekt V.O., Saint Petersburg, 199178, Russian Federation, e-mail: proursin@gmail.com.

Oleg V. Prouzsin, Candidate of Engineering, Associate Professor, Department of Information and Computer Systems, Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9 Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation, e-mail: pvo777@yandex.ru.

Вклад авторов в статью

Бурсиан Е.Ю. выполнила анализ литературы по теме исследования, предложила расчетный пример и участвовала в составлении резюме, введения, заключения и списка источников.

Проурзин В.А. поставил и исследовал задачу оценки показателей надежности сложной системы по данным эксплуатации, исследовал методы статистического анализа больших данных и методы робастной оценки параметра положения зашумленной выборки и принял основное участие в составлении разделов 1 и 2 статьи и участие в составлении введения и заключения.

Проурзин О.В. разработал алгоритмы и программы статического эксперимента, выполнил расчет примеров статистического моделирования, провел сравнительный анализ методов оценки показателей надежности на примере системы с мостиковой схемой и принял основное участие в составлении раздела 3 статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Прогностические модели надежности передачи электрической энергии (на примере АО «Тываэнерго») Predictive models of the dependability of electric power transmission (using the example of AO Tyvaenergo)

Наумов И.В.^{1,2}

Naumov I.V.^{1,2}

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет, Российская Федерация, Иркутск,

²Иркутский государственный аграрный университет имени А.А. Ежевского, Российская Федерация, Иркутск

¹Irkutsk National Research Technical University, Russian Federation, Irkutsk, ²A.A. Yezhevsky Irkutsk State Agrarian University, Russian Federation, Irkutsk

professornaumov@list.ru



Наумов И.В.

Резюме. Цель. Произведен анализ повреждаемости электрических сетей компании АО «Тываэнергосбыт» период 2014-2022 гг. и превентивная оценка аварийных отключений в сетях этой компании в 2023 г. Дана краткая историческая справка образования компании, приведена характеристика ее электросетевой структуры. Рассмотрена повреждаемость элементов, а также основного электрооборудования электрических сетей компании. Проанализировано количество электрической энергии, недопоставленной потребителям в результате аварийных отключений. Осуществлена классификация количества отказов в зависимости от величины недоотпуска электрической энергии. Произведено исследование применимости отдельных методов прогнозирования количества аварийных отключений для полученного интерполированного ряда предшествующих отказов. Установлен наиболее целесообразный метод, на основании которого произведена превентивная оценка повреждаемости исследуемых электрических сетей по каждому месяцу 2023 г. **Методы.** В статье применяются методы математического анализа, общенаучные методы научных исследований, свойства и возможности графического редактора MATLAB и таблиц Excel. Для создания прогнозных моделей рассмотрены статистические и кибернетические методы прогнозирования. Произведена оценка вероятности возникновения событий отказов в исследуемых электрических сетях. Получены уравнения авторегрессионных моделей событий отказов, позволяющие произвести прогностическую оценку отказов по месяцам года. **Результаты** исследования могут быть полезны специалистам компании Тываэнергосбыт, а также другим электросетевым компаниям, разрабатывающим перспективные противоаварийные мероприятия по повышению уровня надежности электроснабжения. **Заключение.** Предлагаемый в статье подход к превентивной оценке аварийных отключений показал, что наиболее эффективным методом прогнозирования отказов в электрических сетях компании является метод авторегрессионных моделей с использованием технологий интерполяции данных предшествующих отказов. При этом вероятность осуществления прогноза составляет 95%.

Abstract. Aim. The paper analysed the damage rate of the electric power networks of AO Tyvaenergosbyt between 2014 and 2022 and preventively evaluates emergency shutdowns in the company's networks in 2023. The author provides a brief historical reference regarding the company's foundation, a description of the structure of its power supply network. The damage rate of elements, as well as main electrical equipment of the company's power supply network were examined. The quantity of electrical power undersupplied to customers as the result of emergency shutdowns was analysed. The number of failures was classified depending on the amount of undersupplied electrical power. The paper studied the applicability of certain methods of prediction of the number of emergency shutdowns for the obtained interpolated series of preceding failures. The most appropriate method was established that was used for preventively evaluating the damage rate of the examined power networks for each month of 2023. **Methods.** The paper uses methods of mathematical analysis, general scientific methods of research, properties and capabilities of the MATLAB graphic interface and Excel tables. Statistical and cybernetical methods of prediction were considered for the purpose of predictive model development. The probability of failures within the examined power networks was evaluated. Equations were obtained for autoregression failure models that enable predictive evaluation of failure by months. **Results** of the study may prove to be useful to the experts of Tyvaenergosbyt, as well as other power grid companies that are developing advanced emergency prevention activities aimed at improving the reliability of power supply. **Conclusion.** The approach to predictive evaluation of emergency shutdowns proposed in the paper showed that the most efficient method of predicting failures in a company's power networks is the method of autoregression models using interpolation of data on preceding failures. The probability of prediction fulfilment is 95%.

Ключевые слова: прогностическая модель, повреждаемость, прогностическая оценка, уравнение авторегрессии, искусственная нейронная сеть, отказы, недоотпуск электроэнергии.

Keywords: predictive model, damage rate, predictive valuation, autoregression equation, artificial neural network, failures, undersupply of energy.

Для цитирования: Наумов И.В. Прогностические модели надежности передачи электрической энергии (на примере АО «Тываэнерго») // Надежность. 2023. №4. С 31-38. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-4-31-38>

For citation: Naumov I.V. Predictive models of the dependability of electric power transmission (using the example of AO Tyvaenergo). Dependability 2023;4:31-38. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-4-31-38>

Поступила: 31.05.2023 / **После доработки:** 26.09.2023 / **К печати:** 20.11.2023

Received on: 31.05.2023 / **Upon revision:** 26.09.2023 / **For printing:** 20.11.2023

Введение

Уровень электропотребления в нашей стране увеличивается, и будет возрастать год от года. Это, безусловно связано с увеличивающимися темпами развития всех отраслей хозяйственной деятельности государства. Так, по опубликованным данным, спрос на электрическую энергию по ЕЭС России к концу 2027 г. оценивается в размере 1159,905 млрд. кВт·ч, что больше объема потребления электрической энергии 2020 г. на 126,187 млрд. кВт·ч.¹ При этом следует учитывать и продолжающуюся специальную военную операцию, требующую значительных энергетических затрат при производстве гигантского количества военной продукции. В связи с этим снижение уровня аварийности при транспортировке электроэнергии (ЭЭ) к месту ее потребления и, соответствующее уменьшение величины ее недоотпуска является одной из важнейших задач Российской электроэнергетики.

Надежность транспорта (ЭЭ) является одним из наиболее значимых критериев оценки уровня эффективности электроснабжения. При этом передача ЭЭ посредством воздушных линий электропередачи является наиболее уязвимым способом ее транспорта, поскольку зависит от многочисленных факторов, связанных с территориальными и климатическими особенностями местности, условий эксплуатации и степени старения и износа основных элементов электрических сетей.

Осуществление систематического анализа уровня аварийности многочисленных электроэнергетических сетевых компаний на территории России, установление причинности возникновения событий тех или иных отказов, установление взаимосвязи возникновения аварий с сезонными, климатическими и другими особенностями отдельных территорий – все это позволяет создавать надежную базу данных аварийности в структурных подразделениях ПАО «Россети». А накопление таких данных, в свою очередь, позволяет осуществлять

превентивную оценку возможных нарушений электрообеспечения для отдельных компаний на определенную перспективу.

В научной литературе неоднократно освещались вопросы анализа надежности транспорта ЭЭ в различных электросетевых компаниях России [1-6]. Прогнозирование уровня надежности обеспечения электроэнергией во многом снижает риски перерывов электроснабжения и, соответственно, способствует не только повышению эффективности использования ЭЭ, но также и сохранности элементов электрических сетей и основного электрооборудования. Это становится возможным вследствие проведения соответствующих превентивных мероприятий, разработанных на основе данных прогностического анализа функционирования электрических исследуемых сетей.

В основе методов вероятностного анализа электроэнергетических задач лежат достаточно глубоко проработанные и сформированные преобразования систем случайных величин. В результате расчеты режимов работы технических систем с учетом вероятностной природы их параметров зачастую сводятся к детерминированным расчетам, например, в качестве исходных данных рассматриваются средние значения наблюдаемых величин².

К распространенным методам прогнозирования относят статистические методы и методы Data Mining (интеллектуальный анализ данных). При этом к статистическим методам относятся методы теории вероятностей и математической статистики; регрессионного анализа; максимального правдоподобия, экстраполяция временных рядов и др. Для оценки многих, случайно изменяющихся, параметров используются законы распределения вероятностей, среди которых выделим нормальное, гамма, Вейбулла, Пирсона III типа, трехпараметрическое степенное и др.³ Но следует отметить,

² Основные законы распределения. [Электронный ресурс]. – Режим допуска: <http://www.mathtask.ru/0032-principal-laws-of-distribution.php> (дата обращения: 20.05.2023).

³ Теория вероятностей и математическая статистика. [Электронный ресурс]. – Режим допуска: https://portal.tpu.ru/SHARED/c/CHERNYSHEVAT/academics/TViMS/Tab/Sluch_Velich.pdf (дата обращения: 24.05.2023).

¹ Об утверждении схемы и программы развития Единой энергетической системы России на 2021-2027 годы / Приказ Министерства энергетики Российской Федерации №88 от 26 февраля 2021 г. Электронный ресурс: <https://minenergo.gov.ru/node/20706>. 28.12. 2021/

что одним из условий построения закона распределения вероятностей является отсутствие автокорреляционной связи между значениями исследуемого параметра.

В случае, когда значение коэффициента превышает 0,7, можно говорить о наличии сильной внутрирядной связи, позволяющей строить авторегрессионные уравнения и осуществлять прогноз исследуемого показателя. В этом случае уместно использовать кибернетические методы Data Mining, в которых используются основы компьютерной математики и технологии искусственного интеллекта. В число таких методов входят: эволюционное программирование, использование искусственных нейронных сетей, системы обработки экспертных знаний¹. В статье использовался метод искусственных нейронных сетей (НС), как наиболее часто применяемый в превентивной оценке событий в электроэнергетических системах. В качестве средства создания НС выбрана среда моделирования Matlab, поскольку она является простой в использовании и обладает высокой скоростью работы [7].

Характеристика электрических сетей АО «Тываэнергосбыт»

Условимся в дальнейшем именовать рассматриваемый объект исследования ТЭ.

История электрификации Тувинской республики начинается с 1925 г., когда впервые в единственном каменном здании г. Кызыл был установлен нефтяной генератор, вырабатывающий 40 кВт·ч электрической энергии. И только в 1932 г. была первая электростанция, мощностью 500 кВт.²

В своем современном виде АО ТЭ было организовано 01.03 2020 г. В его состав входит 4 основных отделения районных электрических сетей (РЭС) (Центральные РЭС, Западные РЭС, Южные РЭС, Восточные РЭС) и одно производственное объединение «Тываэнергосбыт». Общая территория обслуживания составляет 110,28 тыс. кв. км, а протяженность 8379 км. Протяженность ЛЭП по классам номинального напряжения представлена на рис. 1. Как видно из этого рисунка наиболее протяженными являются линии 6-10 кВ. При этом, в составе ЛЭП всех напряжений, на долю кабельных линий приходится 10,5%. Общее количество подстанций (ПС) составляет 1225 ед. из них 35 ПС 110/35 кВ и 1190 ПС 6-10/0,4 кВ³. Общее количество населения, проживающего в населенных пунктах на территории 17 районов, получающих электрическую энергию от сетей

ТЭ (5 городов, 1 поселок городского типа, 144 сельских населенных пунктов) составляет 336251 чел.^{4,5}. Анализ баланса электрической энергии за период 2016-2021 гг. показал, что общий объем переданной энергии в сети ТЭ составил 10133,193 млн. кВт·ч, а общее количество полезного отпуска ЭЭ из сетей ТЭ потребителям составил 2770,159 млн. кВт·ч. При этом Суммарное количество потерь ЭЭ по сетям всех напряжений составило 1334354 млн. кВт·ч.⁶

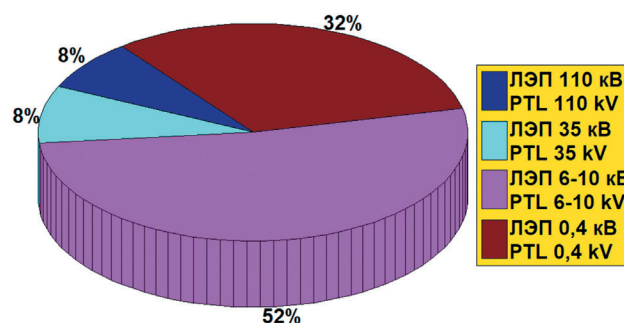


Рис. 1. Характеристика протяженности ЛЭП компании по уровням номинального напряжения

Анализ уровня аварийности электрических сетей ТЭ

Анализ аварийных ситуаций происходивших в сетях ТЭ будем рассматривать за период 2014-2022 гг. На рис. 2-4 представлены диаграммы изменения количества отказов и величины недоотпуска электрической энергии за исследуемый период⁷.

Анализ рис. 2-4 показал следующее. За весь период исследования (2014-2022 гг.) общее количество отказов составило 9277. Самым «аварийным» следует считать месяц май, на долю которого приходится 14,7% всех отказов (1362 шт.). При этом следует отметить, что в этом месяце повреждаемость в сетях выше, чем в остальные месяцы для всего ряда лет, за исключением 2019 г. Наименьшее количество повреждений (574 отказа) приходится на долю февраля (6,2%). На рис. 3 ось абсцисс представляет собой изменение по годам: 2014-2022 гг.

В целом, наибольшее количество повреждений происходит в весенне-летний период (май, июнь, июль) – 34,5% (3198 отк.), наименьшее соответствует совокупности август, сентябрь, октябрь – 20,7% (1921 отк.). Другие месяцы: ноябрь, декабрь, январь – 21,6% (2007 отк.); февраль, март, апрель – 23,2% (2151 отк.).

⁴ Численность населения в Тыве. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://gogov.ru/population-ru/tva> (дата обращения: 26.02.2023).

⁵ Населенные пункты Тывы. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/> (дата обращения: 26.02.2023).

⁶ Россети Сибирь Тываэнерго. Раскрытие информации. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.tuvaenergo.ru/about/outinf.php> (дата обращения: 26.02.2023).

⁷ Сводные данные об аварийных отключениях Тываэнерго. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.tuvaenergo.ru/about/nstat.php> (дата обращения: 26.05.2023).

¹ Обзор методов Data Mining. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://hsbi.hse.ru/articles/metody-data-mining-obzor-i-klassifikatsiya/> (дата обращения: 24.05.2023).

² История АО «Тываэнерго» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.tuvaenergo.ru/museum/news.php?ELEMENT_ID=845 (дата обращения: 24.05.2023).

³ Россети Сибирь Тываэнерго. Характеристики. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.tuvaenergo.ru/about/harakteristiki.php> (дата обращения: 26.02.2023).

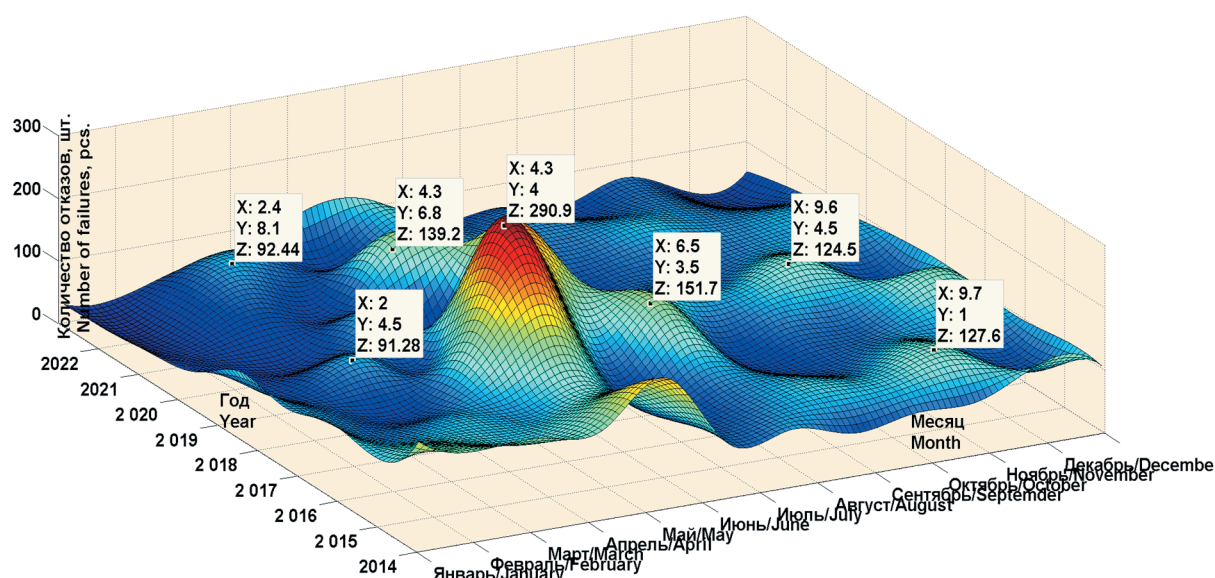


Рис. 2. Изменение количества отказов в исследуемых электрических сетях ТЭ

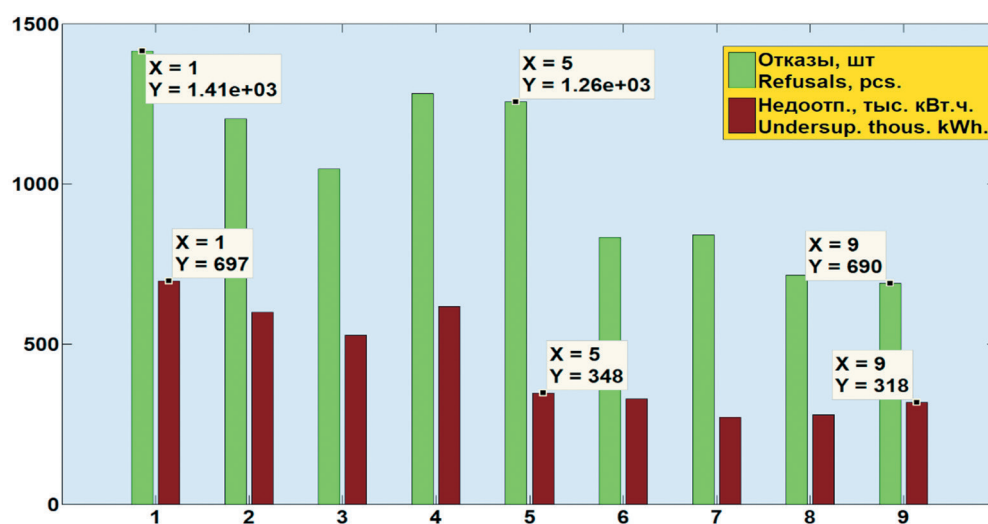


Рис. 3. Диаграммы изменения аварийности и количества недопоставленной энергии в сетях ТЭ

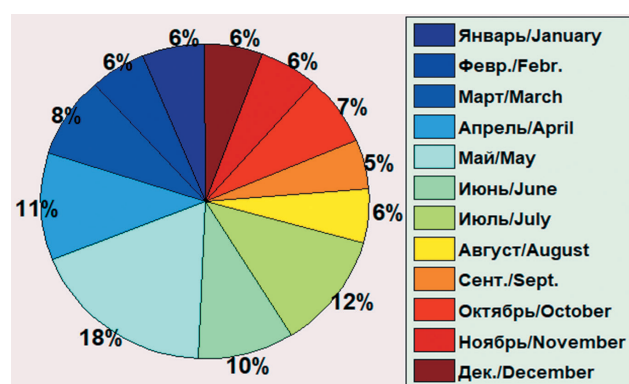


Рис. 4. Распределение суммарного недоотпуска электроэнергии (тыс. кВт.ч.) по месяцам года за исследуемый период (2014-2022 гг.)

Как видно, на протяжении последних 6 лет отмечается устойчивая тенденция снижения аварийности. На основе анализа рис. 3 установлено, что общая величина недо-

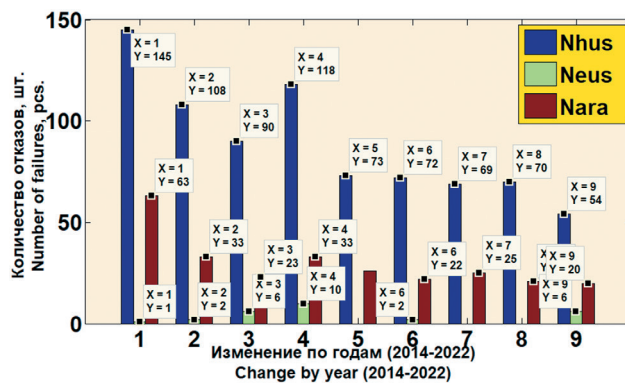
отпуска ЭЭ за исследуемый период составила 3985,11 тыс. кВт·ч ЭЭ.

Вместе с этим простая констатация аварийности не всегда может адекватно оценивать реальную ситуацию последствий аварийных отключений. В общей характеристике отказов большое значение имеет величина недоотпуска электрической энергии.

Из анализа диаграммы (см. рис.4) следует, что наибольший недоотпуск ЭЭ соответствует также месяцу маю – 18,3% (727,5 кВт·ч), наименьший – февралю – 5,55% (221,45 кВт·ч).

Кроме того, существенное значение в общем объеме информации о повреждениях, имеет количество тех отказов, которые привели к значительной величине недоотпуска ЭЭ.

К таким отказам можно отнести: N_{HUS} – количество отказов, в результате которых недоотпуск ЭЭ превышает 1 тыс. кВт·ч (высокоинтенсивные отказы – *high under-supply*); N_{EUS} – количество отказов, в результате

Рис. 5. Изменение количества отказов (N_{HUS} , N_{EUS} , N_{ARA})

которых недоотпуск ЭЭ превышает 10 тыс. кВт·ч. (экстремальные отказы – *extreme under-supply*). Кроме того, интерес могут представлять и N_{ARA} – количество отказов, после которых питание восстанавливается посредством автоматического повторного включения (самовосстанавливающиеся – *automatic re-activation*).

Как показывает анализ рис. 5, доля HUS-отказов в общем объеме составляет 8,61% (799 отк.) (см. рис. 5, столбцы диаграммы синего цвета), при этом доля EUS-отказов (рис. 5, столбцы диаграммы зеленого цвета) в объеме HUS-отказов составляет 3,4% (27 тк.). При этом следует отметить, что отказы EUS-типа в отдельных случаях превышают 30 тыс. кВт·ч. Более всего отказов, повлекших значительный недоотпуск ЭЭ, произошло в 2017 г.: HUS-типа 14,8% (118 отк.), отказов EUS-типа – 2,7% (10 отк.). В 2018, 2020 и 2021 г. отказов EUS-типа не наблюдалось. Количество ARA-отказов (см. рис. 5, столбцы диаграммы красного цвета) в объеме всех произошедших отключений ЭЭ составила 2,87% (266 отключений).

Большинство отказов типа HUS происходило по причине износа ЛЭП 10 кВ. В качестве примера можно привести аварийную ситуацию от 09.01.2017 г. Отказ продолжительностью 2 ч. 53 мин. привел к недоотпуску ЭЭ 1,442 тыс. кВт·ч. Причинами послужило: «3.4.7 Износ шлейфа фазы «А» на опоре №1 к ТП № 489; 4.13 Из-за старения в процессе эксплуатации произошло отгорание шлейфа фазы «А»...»¹. Отказы HUS-типа, в основном происходят в электрических сетях 10-35 кВ и связаны, преимущественно с «3.4.9.02. Превышение параметров воздействия ветровых нагрузок относительно условий проекта...». В низковольтных электрических сетях преимущественной причиной отказов является «несвоевременное перераспределение нагрузок ...» по фазам трехфазной системы. Так, например, за 4-й квартал 2022 г. из общего количества отказов (1029 отключений) на долю отказов по указанной причине относится 41,63% (428 откл.)².

¹ Сводные данные об аварийных отключениях Тывазэнерго за 2 квартал 2017 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.tuvaenergo.ru/about/nstat.php> (дата обращения: 26.05.2023).

² Сводные данные об аварийных отключениях Тывазэнерго за 4 квартал 2022 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.tuvaenergo.ru/about/nstat.php> (дата обращения: 26.05.2023).

Превентивная оценка повреждаемости электрических сетей ТЭ

Как уже было отмечено выше, получение прогностических оценок возникновения возможных аварийных ситуаций в значительной степени способствует эффективности планируемых противоаварийных мероприятий. Рассмотрим возможность создания прогностических моделей развития аварийных ситуаций на 2023 г. по месяцам каждого года. В качестве основной информации будем использовать суммированные данные отказов по месяцам для каждого года исследуемого периода.

Если рассматривать представленные ряды по годам, то коэффициент автокорреляции по каждому году имеет крайне низкое значение. При рассмотрении изменения отказов по месяцам каждого года коэффициенты автокорреляции каждого ряда принимают иные значения, но для большей части месяцев (с марта по ноябрь) эти значения также имеют низкие значения (от 0,11 до 0,54). Поэтому для увеличения значений выборки используем интерполяцию данных [8], позволяющую определить промежуточные значения ряда.

В качестве инструментария использована программа «Interpolation», позволяющая производить, линейную, билинейную и бикубическую интерполяции. При шаге интерполяции, равном 4, из 9 значений получено 72 значения ряда – 12 рядов для каждого месяца года. С использованием таблиц Excel получены коэффициенты автокорреляции для каждого этих рядов, принимающие значения в диапазоне от 0,982 до 0,999. Для выбора наиболее эффективного метода прогнозирования произведем исследование ряда данных, имеющего самый высокий коэффициент автокорреляции. Это февраль, для которого $\beta = 0,999$. Для проверки будем сравнивать полученное значение прогноза для ряда данных отказов февраля (2014 по 2021 гг.) с известным значением количества отказов для февраля 2022 г. При этом прогнозирование произведем двумя способами: посредством использования статистических методов и кибернетических методов Data Mining.

Статистические методы. В качестве базового метода будем использовать метод регрессионного анализа³.

Используя таблицы Excel, получим модель изменения отказов интерполированного ряда (февраль 2014-2021 гг.), а также уравнение авторегрессии для определения прогнозируемого значения количества отказов в феврале 2022 г. (рис. 6).

Подставляя в полученное уравнение значение последней величины исследуемого ряда (27 отк.), получаем прогнозируемую величину отказов в феврале 2022 г.

³ Трофимова Е.А. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие / Е. А. Трофимова, Н.В. Кисляк, Д.В. Гилев; [под общ. ред. Е.А. Трофимовой] ; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург: Изд-во Урал, ун-та, 2018. – 160 с.

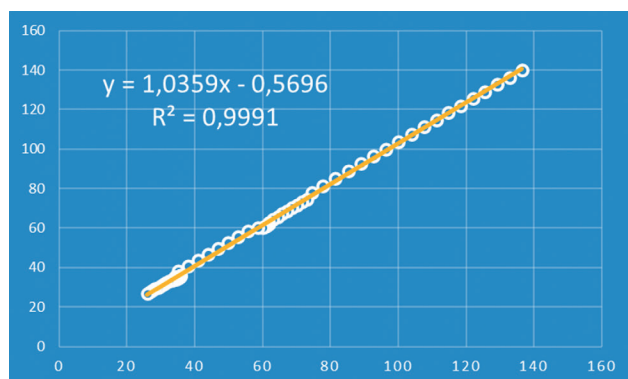


Рис. 6. Авторегрессионная модель и уравнение для получения прогноза количества отказов в феврале 2022 г.

равную 27,3997. Сравнивая значение количества отказов в феврале 2022 г., равное 26, получаем высокую вероятность прогноза, равную 95%.

Использование *кибернетических методов*. В качестве одного из методов используем технологию искусственного интеллекта – метод искусственных нейронных сетей (ИНС) [9].

В качестве инструментария создания ИНС использована среда моделирования MATLAB, поскольку одним из существенных преимуществ данного способа является простота использования и быстрота получения результата. Средой проектирования и обучения ИНС выбраны инструмент временных рядов «Time Series Tool» и нелинейная авторегрессия (NAR), которые позволяют реализовать ИНС прямого распространения, позволяющая предсказать значение результирующего признака с учетом предыдущих значений с различным сдвигом d [10].

Для поиска наиболее приемлемого результата прогноза (при сравнении с известным значением количества отказов в феврале 2022 г.), для обозначения и тестирования данных из 64 значений отказов исследуемого ряда, путем случайного перебора данных было принято 7 вариантов соотношений: обучение-утверждение-тестирование (70-15-15; 85-5-10; 90-5-5; 80-10-10; 75-15-10; 85-10-5; 75-10-15).

На рис. 7, а представлен один из рассмотренных вариантов. Кроме того, для каждого из заданных интервалов принимались по несколько вариантов сочетаний количества нейронов и задержек (рис. 7, б).

Табл. 1. Уравнения авторегрессии и результаты прогноза количества отказов в 2023 г

Месяц года Year month	Уравнение авторегрессии The autoregression equation	Значение прогноза Forecast value
Январь/January	$y = 1,0293x - 0,2582; R^2 = 0,995$	29
Февраль/February	$y = 1,0359x - 0,5696; R^2 = 0,9991$	26
Март /March	$y = 1,0445x - 2,2112; R^2 = 0,979$	55
Апрель/April	$y = 1,0053x + 0,459; R^2 = 0,9778$	73
Май/May	$y = x; R^2 = 1$	115
Июнь/June	$y = 0,9962x + 0,0674; R^2 = 0,9863$	107
Июль/July	$y = 0,974x + 2,903; R^2 = 0,9813$	58
Август/August	$y = 0,9553x + 3,4491; R^2 = 0,9724$	44
Сентябрь/ Sept.	$y = 0,975x + 2,0946; R^2 = 0,9623$	60
Октябрь/ October	$y = 0,9813x + 1,9292; R^2 = 0,9867$	45
Ноябрь/ Novemb.	$y = 1,0386x - 1,5784; R^2 = 0,9829$	51
Декабрь/ Decem.	$y = 0,9912x + 1,5886; R^2 = 0,9961$	36

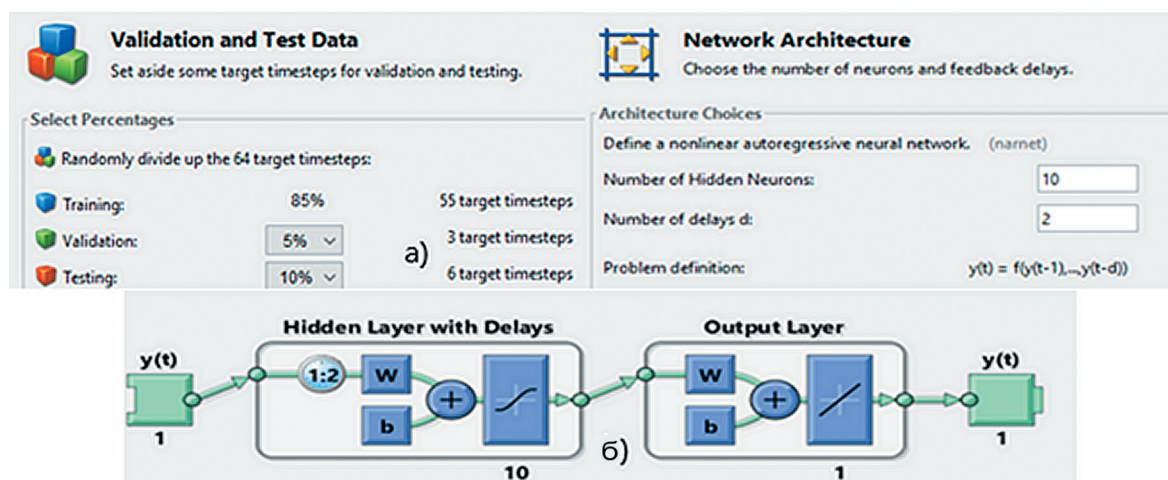


Рис. 7. Создание архитектуры искусственной нейронной сети для осуществления прогноза отказов в феврале 2022 г.:

а) вариант модели обозначения и тестирования; б) вариант сочетаний нейронов и задержек

Несмотря на все попытки обучения созданных вариантов ИНС и их обучение, максимальное приближение к исходному результату (26 отказов) составило 22,15. Таким образом, максимальная вероятность соответствия прогноза реальному значению составляет 85%. В связи с этим, несмотря на многочисленные попытки обучения различных вариантов ИНС, видно, что полученный результат прогноза с использованием авторегрессионных моделей более предпочтителен.

Исходя из рассмотренного примера, произведем создание прогностических моделей отказов для каждого месяца 2023 г., используя технологию получения уравнений авторегрессии. Результаты исследования представлены в табл. 1.

На основе анализа рис. 2-3 установлено, что, начиная с 2019 г., с января по март, с июня по август, а также в октябре и декабре количество отказов существенно сокращается. В связи с этим, для более корректного сравнения исследуемой аварийной обстановки в электрических сетях ТЭ с прогнозируемой аварийной обстановкой в 2023 г. произведем усреднение количества отказов с 2019 по 2022 гг. и сравним эти значения с прогнозируемой ситуацией по данным табл. 1 (рис. 8). Для апреля, мая, сентября и ноября динамика снижения или возрастания отказов отсутствует.

Как видно из рис. 8, прогнозируемое количество отказов по месяцам (январь, февраль, март, июнь, июль, август, октябрь и декабрь) 2023 г. в среднем меньше (на 20%), чем средневзвешенное количество фактических отказов (с 2019 по 2022 гг.). Для оставшихся четырех месяцев прогнозные модели предсказывают увеличение количества отказов: в апреле на 2,7 %; в мае на 17,4 %, в сентябре на 5 % и в ноябре на 2%.

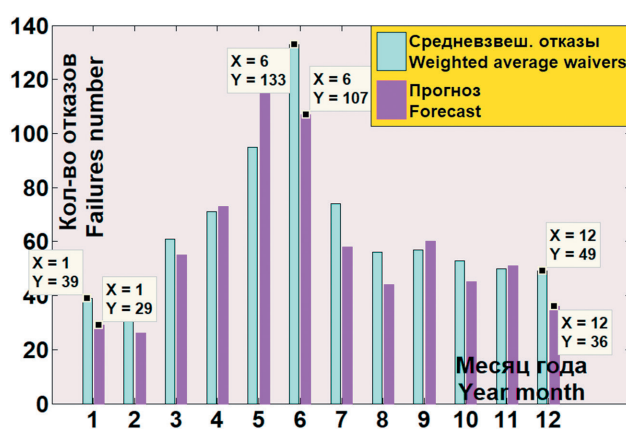


Рис. 8. Диаграммы изменения действительных и прогнозируемых отказов

Полученные прогнозные модели возможной аварийной обстановки по каждому месяцу 2023 г. могут быть использованы руководством компании ТЭ в качестве информации для разработки превентивных противоаварийных и профилактических мероприятий для повышения уровня эффективности транспорта электрической энергии по электрическим сетям компании.

Заключение

На основании произведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Повреждаемость элементов электрических сетей компании ТЭ весьма велика, что объясняется значительным уровнем износа, а также существенной несбалансированностью режимов работы низковольтных электрических сетей, обусловленной неравномерным распределением однофазных электроприемников в трехфазной системе и несвоевременным перераспределением нагрузки в этих электрических сетях. При этом наибольшее количество повреждений и недоотпуска электрической энергии приходится на май месяц каждого года.

2. Произведена классификация отказов по количеству недопоставленной электроэнергии, что может послужить основой для разработки превентивных противоаварийных мероприятий руководством компании.

3. Исследована возможность использования нескольких методов прогностической оценки событий аварийных отключений на краткосрочную перспективу. Установлено, что наиболее эффективным способом прогнозирования является использование статистических методов, в частности метода получения уравнений авторегрессии.

4. На основе произведенного исследования получены уравнения авторегрессии, использование которых позволило получить прогнозные значения повреждаемости электрических сетей ТЭ по каждому месяцу 2023 г.

Библиографический список

1. Наумов И.В. Анализ причин повреждаемости распределительных электрических сетей 10 кВ (На примере Южных электрических сетей г. Иркутска) / И.В. Наумов, Е.В. Карпова // Надежность и безопасность энергетики. 2018. № 4(11). С. 299-304.
2. Naumov I.V. Reliability level research in distribution electrical networks of Irkutsk / I.V. Naumov, E.V. Karpova, D.N. Karamov // E3SWeb of Conferences. 2019. Vol. 114. Id. 03005. DOI: 10.1051/e3sconf/20191140
3. Наумов И.В. К вопросу о повреждаемости воздушных линий электропередачи в системах электроснабжения / И.В. Наумов, Д.Н. Карамов // Надежность и безопасность энергетики. 2021. № 2(14). С. 84-91.
4. Наумов И.В. Анализ работы электрических сетей «Облкоммунэнерго» Иркутской области // Надежность и безопасность энергетики. 2021. № 3(14). С. 100-110.
5. Наумов И.В. О функционировании филиала МРСК «Сибири» ПАО Россети АО «Читаэнергосбыт» // Надежность и безопасность энергетики. 2022. № 4(15). С. 231-239.
6. Наумов И.В. Вопросы надежности транспорта электрической энергии (на примере компании ПАО «Красноярскэнергосбыт») // Надежность и безопасность энергетики. 2023. № 1(16). С. 15-26.

7. Бильгаева Л.П. Исследование моделей нейросетевого прогнозирования в среде Matlab / Л.П. Бильгаева, К.Г. Власов // Приложение математики в экономических и технических исследованиях. 2017. № 1(7). С. 11-19.

8. Данилов А.М. Интерполяция, аппроксимация, оптимизация: анализ и синтез сложных систем: моногр. / А.М. Данилов, И.А. Гарькина. Пенза: ПГУАС, 2014. 168 с.

9. Щербатов И.А. Применение искусственных нейронных сетей при управлении энергетическим оборудованием. Часть 2. Прогнозирование значений параметров, дефектов, отказов и технического состояния // Новое в Российской электроэнергетике. 2020. № 10. С. 37-46.

10. Клычев В.Е. Применение нелинейных авторегрессионных моделей нейронных сетей для прогнозирования экономических показателей // Ученые записки Тамбовского отделения РОСМУ. 2016. № 5. С. 133-136.

References

1. Naumov I.V., Karpova E.V. [Analysis of causes of failures in 10 kV electrical power distribution networks (on the example of the Southern electrical networks of the city of Irkutsk)]. *Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki* 2018;11(4): 299-304. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2018-11-4-299-304>. (in Russ.)

2. Naumov I.V., Karpova E.V., Karamov D.N. Reliability level research in distribution electrical networks of Irkutsk. *E3S Web of Conferences* 2019;114: Id. 03005. DOI: 10.1051/e3sconf/20191140.

3. Naumov I.V., Karamov D.N. On damage rate of overhead power transmission lines in power supply systems. *Safety and Reliability of Power Industry* 2021;14(2):92-99. (in Russ.)

4. Naumov I.V. Analysis of operation of Oblkommunergo electric networks of Irkutsk Region. *Safety and Reliability of Power Industry* 2021;14(3):100-110. (in Russ.)

5. Naumov I.V. On functioning of Siberian IDGC branch of PJSC Rosseti – JSC Chitaenergosbyt. *Safety and Reliability of Power Industry* 2022;15(4):231-239. (in Russ.)

6. Naumov I.V. Issues of electric energy transport reliability (on example of JSC Krasnoyarskenergosbyt). *Safety and Reliability of Power Industry* 2023;16(1):15-26. (in Russ.)

7. Bilgaeva L.P., Vlasov K.G. The study of models of neural network forecasting in Matlab. *Prilozhenie matematiki v ekonomicheskikh i tekhnicheskikh issledovaniyakh* 2017;1(7):11-19. (in Russ.)

8. Danilov A.M., Garkina I.A. [Interpolation, approximation, optimisation: analysis and synthesis of complex systems: a monograph]. Penza: PGUAS; 2014. (in Russ.)

9. Shcherbatov I.A. [Use of artificial neural networks for controlling power engineering equipment. Part 2. Predicting the values of parameters, defects, failures and technical state]. *Novoye v rossiyskoy elektroenergetike* 2020;10:37-46. (in Russ.)

10. Klychev V.E. [Use of nonlinear autoregressive models of neural networks for the purpose of predicting economic indicators]. *[Scholarly notes of the Tambov branch of ROSMU]* 2016;5:133-136. (in Russ.)

Сведения об авторе

Наумов Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Электроснабжения и электротехники Иркутского национального исследовательского технического университета и Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского, Заслуж. Работник ВО РФ, IEEE Senior Member, акад. РАЕ, Иркутск, Российская Федерация, e-mail: professornaumov@list.ru

About the author

Igor V. Naumov, Doctor of Engineering, Professor, Chair Professor, Department of Power Supply and Power Engineering, Irkutsk National Research Technical University and A.A. Yezhevsky Irkutsk State Agrarian University, Honorary Worker of Higher Education, IEEE Senior Member, Member of RANH, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: professornaumov@list.ru.

Вклад автора в статью

Автором исследован уровень аварийности электрических сетей рассматриваемого объекта электроэнергетики выполнено исследование возможного применения нескольких методов для осуществления прогнозирования аварийных состояний, произведена классификация отказов по количеству недопоставленной электроэнергии, что может послужить основой для разработки превентивных противоаварийных мероприятий руководством компании.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Методическое обеспечение надежности камеральной оценки достоверности исполнительных геодезических схем

Guidelines for ensuring the reliability of cameral evaluation of the authenticity of as-built survey maps

Орлова Е.А.^{1*}, Фомин Н.И.¹

Orlova E.A.^{1*}, Fomin N.I.¹

¹Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Российская Федерация, Екатеринбург

¹Ural Federal University, Russian Federation, Yekaterinburg

*e.a.orlova@internet.ru



Орлова Е.А.



Фомин Н.И.

Резюме. Цель. Целью настоящей статьи является демонстрация авторского способа оценки достоверности исполнительных геодезических схем с использованием программы Microsoft Excel и результатов его верификации. Оценка достоверности плано-высотных отклонений строительных конструкций зданий и сооружений, фиксируемых на геодезической схеме, производится в результате сравнения диаграммы распределения значений контрольных точек с графиком нормального распределения (кривой Гаусса). Верификация разработанного способа, представленная в статье, выполнена на основе построения графика квантилей, а также проведения расчетов тремя различными способами, основанными на анализе параметров и статистических характеристик искомой выборки. **Методы.** В данной статье применялся камеральный метод исследования исполнительных геодезических схем, а также методы математической статистики для верификации результатов исследования.

Результаты. Гипотеза о нормальном распределении выборки отклонений контрольных точек исследуемых строительных конструкций проверена и подтверждена следующими способами: построение графика квантилей; проверка «правила трех сигм»; анализ показателей асимметрии и эксцесса; проверка гипотезы о нормальности распределения по критерию согласия Пирсона (Критерий Хи-квадрат). Это позволяет обеспечить надежность и проверяемость результатов в объеме регистрационного контроля исполнительных схем. В статье также обоснована возможность практического применения разработанного авторами способа оценки достоверности исполнительных геодезических схем.

Abstract. Aim. The paper aims to demonstrate a unique method of evaluating the authenticity of as-built survey maps using Microsoft Excel and verification results. The authenticity of the horizontal and vertical deviations of building structures documented in geodetic designs is evaluated by comparing the diagram of control point value distribution with a normal probability plot (Gaussian distribution). The verification of the developed method presented in the paper is based on a quantile plot, as well as calculations using three different methods involving the analysis of the parameters and statistical characteristics of the sought sample. **Methods.** The paper used the cameral method of evaluating as-built survey maps, as well as methods of mathematical statistics for verifying the research findings. **Results.** The hypothesis of normal distribution of the sample of control point deviations of the examined building structures was verified and confirmed using the following methods: quantile plotting; verification of the three sigma rule; analysis of the index of skewness and kurtosis; verification of the hypothesis of normal distribution per Pearson's chi-squared test. That allows ensuring the reliability and verifiability of the results as regards the registration control of as-built drawings. The paper also substantiates the practical applicability of the method of evaluating the authenticity of as-built survey maps developed by the authors.

Ключевые слова: строительные конструкции; исполнительная документация; геодезические схемы; строительный контроль; оценка достоверности; камеральная оценка.

Keywords: building structures; as-built documentation; geodetic designs; construction oversight; evaluation of authenticity; cameral evaluation.

Для цитирования: Орлова Е.А., Фомин Н.И. Методическое обеспечение надежности камеральной оценки достоверности исполнительных геодезических схем // Надежность. 2023. №4. С. 39-44. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-4-39-44>

For citation: Orlova E.A., Fomin N.I. Guidelines for ensuring the reliability of cameral evaluation of the authenticity of as-built survey maps. *Dependability* 2023;4:39-44. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-4-39-44>

Поступила: 17.05.2023 / **После доработки:** 22.09.2023 / **К печати:** 20.11.2023
Received on: 17.05.2023 / **Revised on:** 22.09.2023 / **For printing:** 20.11.2023

Введение

В процессе возведения здания или сооружения обеспечение полного соответствия построенного проектным решениям представляется маловероятным. Поэтому необходимость достоверной фиксации фактических отклонений возведенных несущих конструкций здания или сооружения и их учета для продолжения строительства и возможности безопасной эксплуатации объекта является важной составляющей эффективности строительного контроля. Актуальность достоверного учета отклонений возрастает в связи с существующей практикой передачи подрядчиком застройщику сфальсифицированных исполнительных геодезических схем, т. е. схем, содержащих заниженные планово-высотные отклонения несущих строительных конструкций, например, гражданских зданий [1, 2].

Таким образом, необходимы новые методические разработки по оценке надежности исполнительных геодезических схем несущих конструкций зданий или сооружений и недопущения в них сфальсифицированных значений. Целью данной работы является представление простого и наглядного способа камеральной оценки достоверности исполнительных геодезических схем, разработанного для надежного обоснования решения по инструментальной натурной проверке строительных конструкций зданий или сооружений, а также его верификация. Обработка, анализ и интерпретация результатов экспериментальных исследований реализованы с использованием программы Microsoft Excel, позволяющей осуществить анализ отклонений строительных геодезических схем в автоматическом режиме.

Теоретическое обоснование способа оценки достоверности строительных исполнительных схем

В основе рассматриваемого способа оценки достоверности исполнительных геодезических схем лежит представление величины геометрического отклонения строительной конструкции как случайной величины, зависящей от большого количества различных (случайных) факторов [3, 4]. Эти факторы обусловлены независимыми характеристиками: исполнителей (строители, работники предприятий строительной индустрии; геодезисты, и т. п.); технологий производства работ; применяемых материалов; методов и средств контроля, а также окружающей среды. Таким образом, суммарная ошибка в виде фактического отклонения планово-высотного положения конструкции от проектного значения складывается из большого числа случайных неза-

висимых ошибок. Согласно центральной предельной теореме Ляпунова [5, 6, 7]: если случайная величина X представляет собой сумму большого числа взаимно независимых величин, а влияние каждой из которых на всю сумму мало, то X имеет распределение близкое к нормальному. Таким образом, корректное распределение случайных значений отклонений планово-высотного положения строительных конструкций следует считать близким к нормальному распределению Гаусса.

Алгоритм реализации камерального способа оценки достоверности исполнительных геодезических схем

Алгоритм реализации можно разделить на два этапа.

1. Из оцениваемого комплекта исполнительных геодезических схем формируют выборку или выборки однородных отклонений контрольных точек строительных конструкций (например, колонны, стены, пилоны, балки, фермы и т. п.) в соответствии с видом нормируемого допуска (например, из свода строительных правил СП 70.13330.2012 [8]). После этого, строят гистограмму распределения значений отклонений для каждого вида конструкций.

2. Для каждой гистограммы оценивают степень соответствия распределения значений нормальному распределению Гаусса, например, путем визуального сопоставления вида кривой, соединяющей верхние точки столбцов гистограммы, с видом эталонной кривой нормального распределения в аналогичном масштабе.

Вывод о достоверности (наличии вероятной фальсификации) оцениваемых исполнительных геодезических схем и необходимости натурной проверки планово-высотного положения строительных конструкций может быть сделан на основе ответов на два вопроса:

– соответствует ли вид кривой, соединяющей верхние точки столбцов гистограммы отклонений, эталонной кривой нормального распределения?

– имеются ли отклонения контрольных точек строительных конструкций вне диапазона нормируемого допуска?

Парные отрицательные ответы свидетельствуют о вероятной недостоверности оцениваемых исполнительных геодезических схем и их фальсификации, а также о необходимости проверки данных из оцениваемых схем при помощи инструментального контроля строительных конструкций.

С целью обеспечения доступности и простоты оценки достоверности исполнительных геодезических схем в камеральных условиях, апробация разработанного способа произведена в программе «ПОДИГС, версия 1.0»

(программа для оценки достоверности исполнительных геодезических схем), созданной при помощи функционального инструмента визуализации и анализа данных Microsoft Excel [9]. Программа «ПОДИГС, версия 1.0» предназначена для анализа выборки отклонений контрольных точек строительных конструкций зданий и сооружений, при использовании которой может быть сделан вывод о достоверности или вероятной фальсификации отклонений строительных конструкций на исследуемых исполнительных схемах.

Верификация способа оценки достоверности исполнительных геодезических схем

С целью верификации разработанного способа была исследована исполнительная геодезическая документация, содержащая планово-высотные отклонения строительных конструкций здания литейного цеха ремонтно-машиностроительного завода, зафиксированные в «Техническом отчете по планово-высотной съемке положения строительных конструкций» (далее – технический отчет). Инженерно-изыскательские работы выполнены строительной организацией города Екатеринбурга в 2020 году. Значения геометрических отклонений контрольных точек строительных конструкций промышленного одноэтажного здания, содержащиеся в геодезических схемах (колонны, стропильные и подстропильные фермы, подкрановые балки), имеют нормируемые допуски в СП 70.13330.2012 [8] (табл. 6.1 п. 4, табл. 6.1 п. 6 и табл. 4.9 п. 7 соответственно). В рамках настоящей статьи мы ограничимся выборкой отклонений контрольных точек колонн (объем выборки – 244 значения). Гистограмма распределения значений геометрических отклонений искомой выборки (244 значения планово-высотных отклонений колонн) представлена на рис. 1, вид кривой нормального распределения Гаусса (график – эталон) для объема выборки в количестве 244 значения – на рис. 2.

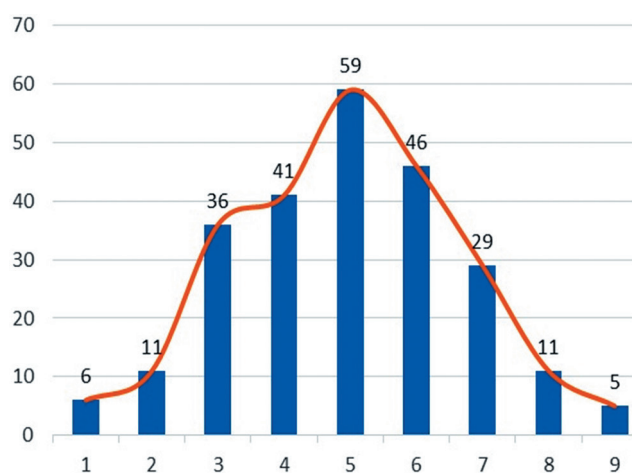


Рис. 1. Гистограмма распределения значений геометрических отклонений

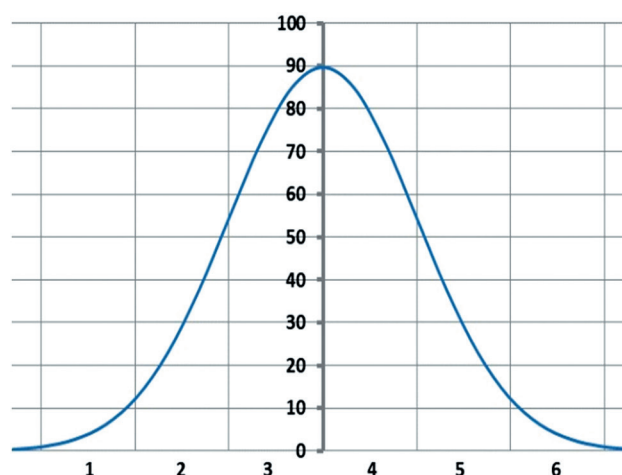


Рис. 2. График-эталон. Вид кривой нормального распределения Гаусса

При оценке построенного графика распределения значений отклонений контрольных точек колонн, путем визуального сопоставления вида кривой, соединяющей верхние точки столбцов гистограммы, с видом кривой нормального распределения графика-эталона (см. рис. 1 и 2), можно сделать вывод о сопоставимости графиков и, соответственно, **вероятной достоверности** исследуемой исполнительной геодезической схемы.

В предлагаемом способе за нулевую гипотезу принимается утверждение, что исследуемая выборка отклонений контрольных точек колонн взята из нормального распределения. Доказательство данной гипотезы будет являться верификацией предлагаемого способа и оценкой возможности его практического применения. Для верификации способа мы рассмотрим комплекс доказательств, а именно: один графический способ и три аналитических.

Способ 1 (графический). Построение графика квантилей (Q-Q plots, Quantile-Quantile plots).

На графике квантилей изображаются квантили двух распределений – эмпирического (то есть построенного по анализируемым данным) и теоретически ожидаемого стандартного нормального распределения. При нормальном распределении точки на графике квантилей должны выстраиваться в прямую линию, исходящую под углом 45 градусов из левого нижнего угла графика [10, 11].

Поскольку указанный графический способ основан на субъективной визуальной оценке данных, результатом его применения будет являться ответ на следующий вопрос:

– разумно ли предположение, что оцениваемая выборка геометрических отклонений строительных конструкций взята из нормального распределения?

Результаты построения графика квантилей для искомой выборки геометрических отклонений контрольных точек колонн в объеме 244-х значений представлены на рис. 3.

Из представленного графика можно заключить следующее: преобладающее большинство точек рас-

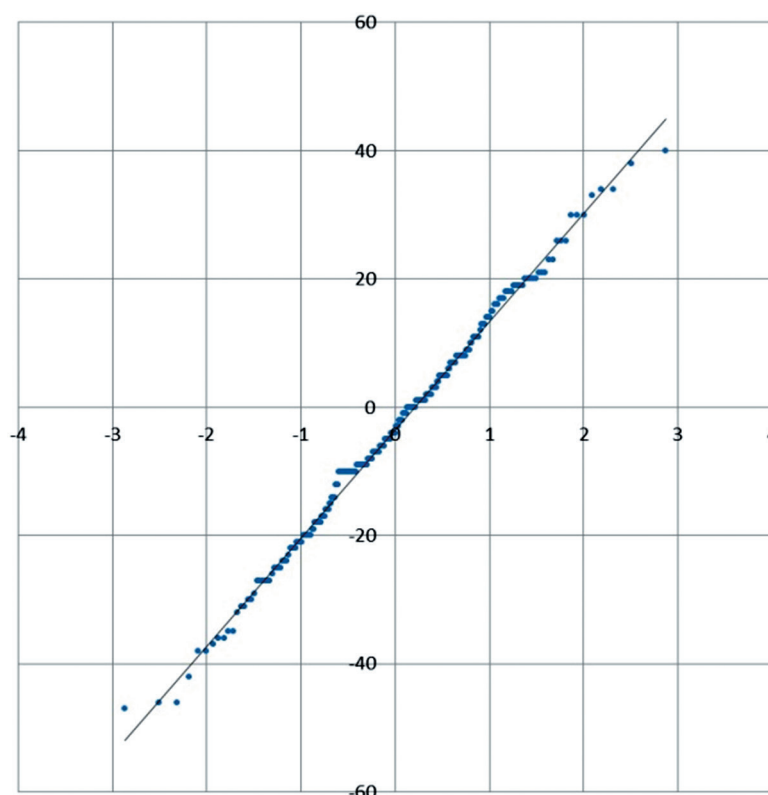


Рис. 3. График квантилей (Q-Q plots, Quantile-Quantile plots)

положено на одной прямой, соответственно, имеет место быть предположение, что оцениваемая выборка геометрических отклонений колонн взята из нормального распределения.

Способ 2 (аналитический). Правило трех сигм.

Правило трех сигм имеет следующую формулировку: если случайная величина распределена нормально, то абсолютная величина ее отклонения от математического ожидания не превосходит утроенного среднего квадратичного отклонения [5, 7].

Соответственно, исследуемая выборка геометрических отклонений строительных конструкций распределена нормально, если все значения исследуемой выборки находятся в диапазоне от $M-3\sigma$ до $M+3\sigma$, где σ – среднее квадратическое отклонение выборки; M – среднее значение выборки.

Расчеты таких параметров, как среднее квадратическое отклонение выборки (σ) и среднее значение выборки (M) производились с помощью удобного и доступного инструмента – программы Microsoft Excel.

Результат расчетов: $M-3\sigma=-54,13$; $M+3\sigma=47,24$.

Минимальное значение отклонения контрольной точки колонны согласно техническому отчету составляет «-47»; максимальное значение – «40».

Поскольку все значения отклонений контрольных точек колонн находятся от $M-3\sigma$ до $M+3\sigma$, можно сделать вывод, что исследуемая выборка геометрических отклонений колонн распределена нормально.

Способ 3 (аналитический). Анализ показателей асимметрии и эксцесса.

С помощью показателей асимметрии (A) и эксцесса (E) можно количественно оценить степень отличия эмпирического распределения от нормального. Эти показатели для нормального распределения равны нулю. Следовательно, если для исследуемой выборки геометрических отклонений строительных конструкций асимметрия и эксцесс имеют небольшие значения (близкие к нулю), можно предположить близость этого распределения к нормальному. В ином случае (то есть при получении больших значений асимметрии и эксцесса), можно делать вывод о значительном отклонении от нормального распределения [5, 7].

Результат расчетов: $A=-0,062$; $E=-0,147$.

Для исследуемой выборки геометрических отклонений контрольных точек колонн асимметрия и эксцесс имеют небольшие значения, близкие к нулю, соответственно, есть основания предположить близость полученного распределения к нормальному.

Способ 4 (аналитический). Критерий согласия Пирсона (Критерий Хи-квадрат).

Критерий согласия – это статистическое правило, по которому принимается или отвергается статистическая гипотеза о том, что исследуемая случайная величина подчиняется заданному эмпирическому закону распределения. Сама идея критерия Хи-квадрат основана на том, что производят измерение разницы между наблюдаемой частотой попадания (эмпирической частоты) в какой-либо интервал и теоретической вероятностью попадания в этот же интервал (теоретической частоты) [5, 7].

Таблица 1. Эмпирическое распределение

№ диапазона отклонений	Значение диапазонов		Эмпирические частоты	Теоретические частоты
	от	до		
1	-47,00	-37,33	6	5
2	-37,33	-27,67	11	13
3	-27,67	-18,00	36	29
4	-18,00	-8,33	41	47
5	-8,33	1,33	59	55
6	1,33	11,00	46	47
7	11,00	20,67	29	30
8	20,67	30,33	11	13
9	30,33	40,00	5	5

Примечание – Значения теоретических частот округлены до целых.

Гипотеза: эмпирическое распределение искомой выборки (выборки отклонений строительных конструкций) является нормальным.

Проверка гипотезы заключается в сопоставлении вычисленного значения $\chi^2_{\text{выч}}$ с табличным значением $\chi^2_{\text{табл}}$, соответствующему выбранному уровню значимости α и числу степеней свободы $\nu=k-m-1$ (где m – количество параметров, оцениваемых по исходной выборке). Если вычисленное значение Хи-критерия больше табличного, то на уровне значимости α проверяемая гипотеза должна быть отвергнута.

Таким образом, при уровне значимости $\alpha=0,05$ и числе степеней свободы $\nu=6$, табличное значение $\chi^2_{\text{табл}}=12,6$.

Подсчет количества значений, которые попадают в каждый из интервалов (эмпирической частоты) и определение теоретической частоты производились в программе Microsoft Excel. Результаты сведены в таблицу «Эмпирическое распределение», представленную в табл. 1.

Результат расчетов: $\chi^2_{\text{выч}}=3,62$.

Сравнивая полученные результаты, получаем, что $\chi^2_{\text{выч}} < \chi^2_{\text{табл}}$ ($3,62 < 12,6$).

Таким образом, на уровне значимости $\alpha=0,05$ и числе степеней свободы $\nu=6$ рассматриваемая гипотеза не противоречит исходным данным, т. е. исходное эмпирическое распределение можно считать нормальным.

Резюмируем: в результате выполненной верификации следует заключить, что предлагаемый способ камеральной оценки достоверности исполнительных геодезических схем является надежным и может применяться на практике для обоснования необходимости инструментальной проверки данных из оцениваемых схем.

Заключение

В статье рассмотрен один из вариантов реализации методического обеспечения оценки достоверности исполнительных геодезических схем. Предлагаемый способ оценки достоверности отличается простотой и наглядностью. В статье показано теоретическое обоснование способа и алгоритм его практического применения. В результате рассмотренного доказательства

гипотезы, положенной в основу способа, выполнена верификация способа и обоснована возможность его практического применения.

Библиографический список

1. Охотский Н.Р. К вопросу о качестве строительной продукции из монолитного железобетона / Н.Р. Охотский // Промышленное и гражданское строительство. 2009. № 12. С. 25–26.
2. Фомин Н.И. Организационно-технологическое обеспечение комплексного повышения эксплуатационных качеств монолитных и сборно-монолитных гражданских зданий. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2022. 112 с.
3. Байбурун А.Х. Качество и безопасность строительных технологий / А.Х. Байбурун, С.Г. Головнев. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2006. 453 с.
4. Байбурун А.Х. Оценка вероятности аварии с учетом ошибок участников строительства // Вестник ЮУрГУ: Серия «Строительство и архитектура». 2015. № 1. С. 10–12.
5. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. М.: Наука, 1969. 576 с.
6. Петров В.В. Предельные теоремы для сумм независимых случайных величин. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 320 с.
7. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. М.: Высшая школа, 1972. 497 с.
8. Свод строительных правил СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87. М.: Госстрой, ФАУ «ФЦС», 2012. 196 с.
9. Программа оценки достоверности исполнительных геодезических схем, версия 1.0 (ПОДИГС, 1.0) : Свидетельство №2022612788 Российская Федерация : №2022611683 : заявл. 10.02.2022 : опубл. 28.02.2022 / Е.А. Орлова, А.А. Стародубцев, Н.И. Фомин. 1 с.
10. Excel2.ru. Справочник по функциям. URL: <https://excel2.ru/articles/proverka-raspredeleniya-na-normalnost-v-ms-excel> (дата обращения: 05.03.2023).
11. R: Анализ и визуализация данных. URL: https://ranalytics.blogspot.com/2012/06/blog-post_14.html (дата обращения: 05.03.2023).

References

1. Okhotsky N.R. Concerning the quality of building production from monolithic ferro-concrete. *Industrial and civil engineering* 2009;12:25-26. (in Russ.)
2. Fomin N.I. [Organisational and process-specific support of comprehensive improvement of the operational qualities of monolithic and half precast civil buildings]. Yekaterinburg: Ural University Press; 2022. (in Russ.)
3. Baiburin A.Kh., Golovnev S.G. [Quality and safety of building technologies]. Cheliabinsk: SUSU Press; 2006.
4. Baiburin A.Kh. Construction accidents probability estimate taking into account errors of construction participants. *Bulletin of SUSU. Series "Construction Engineering and Architecture"* 2015;1:10-12. (in Russ.)
5. Ventsel E.S. Probability theory. Moscow: Nauka; 1969. (in Russ.)
6. Petrov V.V. [Limiting theorem for sums of independent random quantities]. Moscow: Nauka. Chief Editorial Board of Physical and Mathematical Literature; 1987. (in Russ.)
7. Gmurman V.E. [Probability theory and mathematical statistics]. Moscow: Vysshaya Shkola; 1972. (in Russ.)
8. Building acts SP 70.13330.2012. [Load carrying and cladding structures. Revised edition of building codes and regulations 3.03.01-87]. Moscow: Gosstroy, FAU FTsC; 2012. (in Russ.)
9. Orlova E.A., Starodubtsev A.A., Fomin N.I. [Program for verifying the authenticity of as-built survey map, version 1.0 (PODIGS, 1.0): Certificate no. 2022612788 Russian Federation: no. 2022611683: appl. 10.02.2022: publ. 28.02.2022. (in Russ.)
10. [Excel2.ru. Function reference]. (accessed 05.03.2023). Available at: <https://excel2.ru/articles/proverka-raspredeleniya-na-normalnost-v-ms-excel>. (in Russ.)
11. [R: Analysis and visualisation of data]. (accessed 05.03.2023). Available at: https://ranalytics.blogspot.com/2012/06/blog-post_14.html. (in Russ.)

Сведения об авторах

Орлова Екатерина Алексеевна – аспирант, ассистент кафедры «Промышленного, гражданского стро-

ительства и экспертизы недвижимости» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация, e-mail: e.a.orlova@internet.ru

Фомин Никита Игоревич – доцент, кандидат технических наук, директор «Института Строительства и Архитектуры», заведующий кафедрой «Промышленного, гражданского строительства и экспертизы недвижимости» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация, e-mail: nnimoff@mail.ru

About the authors

Ekaterina A. Orlova, postgraduate student, Teaching Assistant, Department of Industrial, Civil Engineering and Property Survey, Ural Federal University, e-mail: e.a.orlova@internet.ru.

Nikita I. Fomin, Associate Professor, Candidate of Engineering, Director, Institute of Civil Engineering and Architecture, Head of Chair, Department of Industrial, Civil Engineering, and Property Survey, Ural Federal University, e-mail: nnimoff@mail.ru.

Вклад авторов в статью

Орловой Екатериной Алексеевной выполнена подготовка исходных данных, проанализированы существующие методы математической статистики для верификации результатов исследования, произведены расчеты, реализована графическая визуализация и анализ результатов исследований, сформулированы выводы.

Фомин Никитой Игоревичем выполнена постановка задачи исследования, осуществлено общее руководство и участие в подготовке статьи.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Исследование влияния гендерных особенностей личности обучающихся в летном училище на успешность прохождения их обучения

Research of the effect of gender-specific personality features of flight school students on the success of their studies

Красильников Г.Т.^{1*}, Крачко Э.А.², Мальчинский Ф.В.¹, Додова Л.М.¹, Медяникова Л.М.¹
Krasilnikov G.T.^{1*}, Krachko E.A.², Malchinsky F.V.¹, Dodova L.M.¹, Medianikova L.M.¹

¹Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков им. Героя Советского Союза А.К. Серова, Российская Федерация, Краснодар, ²Военно-медицинская академия им. С.М. Кирова, Российская Федерация, Санкт-Петербург

¹Hero of the Soviet Union A.K. Serov Krasnodar Higher Aviation School of Pilots, Russian Federation, Krasnodar,

²S.M. Kirov Military Medical Academy, Russian Federation, Saint Petersburg

*gennadykras@mail.ru



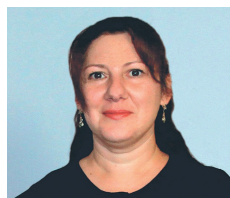
Красильников Г.Т.



Крачко Э.А.



Мальчинский Ф.В.



Додова Л.М.



Медяникова Л.М.

Резюме: Цель. В статье описывается проведение исследования гендерных особенностей личностных характеристик обучающихся в летном училище. В дальнейшем ставилась задача исследовать влияние установленных гендерных личностных особенностей обучающихся мужского и женского пола на их успешность/неуспешность в учебной деятельности, а также в их летной подготовке. **Методы.** В исследовании применялись стандартизированные методы исследования личности: методика СМЛ в интерпретации Л.Н. Собчик и методика 16-факторный личностный опросник (16-ФЛО). Анализ полученных данных проводился с применением описательной статистики программы Excel пакета Microsoft Office 2007, Т-критерия Стьюдента для несвязанных выборок (достоверность различий при $p < 0,05$). **Результаты исследования.** Установлено, что на эффективность учебной деятельности и на успешность профессионального летного обучения оказывают влияние как одинаковые, так и различающиеся личностные качества обучающихся мужского и женского пола. **Заключение.** В результате проведенного исследования выделены гендерные особенности личностных характеристик, коррелирующие с успешностью учебной деятельности и летного обучения обучающихся мужского и женского пола, которые проявляются в виде комплекса личностных характеристик. Установленные личностные характеристики обучающихся мужского и женского пола могут оказывать как позитивное, так и негативное влияние на успешность их учебной деятельности и летной подготовки.

Abstract: Aim. The paper describes a research of gender-specific personality features of flight school students. The eventual task was to research the effect of the identified gender-specific features of the male and female students on their academic and flight training performance.

Methods. The research employed standardised character research methods: L.N. Sobchik's version of MMPI and the 16-factor personality inventory. The resulting data were analysed using descriptive statistics of Microsoft Office 2007 Excel, Student's T-score for unconjugated samples (statistical significance if $p < 0.05$). **Results of the research.** It has been established that the academic and flight training performance are affected by both identical and differing personal qualities of male and female students. **Conclusion.** The conducted research identified gender-related personality features that correlated with the academic and flight training performance of male and female students that manifest themselves as sets of personal attributes. The identified personal attributes of male and female students may have either a positive, or a negative effect on their academic and flight training performance.

Ключевые слова: профессиональный психологический отбор, обучающийся летного училища, учебная деятельность, успешность обучения, летная подготовка, гендерные особенности, личностные свойства. **Keywords:** professional psychological selection, flight school student, learning activity, successful studies, flight training, gender-specific features, personality.

Для цитирования: Красильников Г.Т., Крачко Э.А., Мальчинский Ф.В., Додова Л.М., Медяникова Л.М.. Исследование влияния гендерных особенностей личности обучающихся в летном училище на успешность прохождения их обучения // Надежность. 2023. №4. С. 45-50. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-4-45-50>

For citation: Krasilnikov G.T., Krachko E.A., Malchinsky F.V., Dodova L.M., Medianikova L.M. Research of the effect of gender-specific personality features of flight school students on the success of their studies. *Dependability* 2023;4:45-50. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-4-45-50>

Поступила: 24.03.2023 / **После доработки:** 25.09.2023 / **К печати:** 20.11.2023

Received on: 24.03.2023 / **Upon revision:** 25.09.2023 / **For printing:** 20.11.2023

Введение. Проблема надежности и безопасности полетов остается актуальной с момента возникновения авиации и привлекает интерес исследователей, несмотря на непрерывное совершенствование авиационной техники [3, 10, 16, 19]. Согласно литературным данным, по причине человеческого фактора происходят от 50 до 90% летных происшествий, отмеченных за последние десятилетия [3, 22]. А основным в психологической составляющей человеческого фактора является личность специалиста летной профессии [2, 14, 21]. В последние десятилетия в большинстве стран мира происходит феминизация летного состава как в гражданской авиации, так и военно-воздушных сил [1, 5, 11, 13]. Специальными исследованиями было установлено, что менструации существенного влияния на толерантность женщин к летным перегрузкам не оказывали [5]. Сходные данные были получены при исследовании переносимости интенсивных нагрузок у женщин в спорте высших достижений [12]. В Российской Федерации также осуществляется подготовка летного состава из числа лиц женского пола. Профессиональный психологический отбор (ППО) кандидатов на обучение осуществляется без гендерной дифференциации на основании единых профессиографических требований [14, 15]. Поэтому актуально исследование влияния на успешность обучения гендерных личностных особенностей, поскольку личность является центральным звеном профессионально важных качеств (ПВК) [2, 6, 21].

Методы исследования. Личностные характеристики лиц мужского и женского пола, обучающихся в летном училище, оценивались на основании результатов стандартизированных методов исследования личности – методике СМЛ в интерпретации Л.Н. Собчик [24] и методике 16-факторный личностный опросник (16-ФЛО). Анализ полученных данных проводился с применением описательной статистики программы Excel пакета Microsoft Office 2007, Т-критерия Стьюдента для несвязанных выборок (достоверность различий при $p < 0,05$) [7, 25].

Результаты и обсуждение. На основании данных обследования методикой СМЛ обучающихся мужского и женского пола были составлены обобщенные психологические портреты обучающихся с учетом их гендерной принадлежности. На рис. 1 представлены полученные усредненные профили по данным методики СМЛ в исследуемых выборках обучающихся мужского и женского пола.

Как визуализировано на рис. 1, усредненные личностные профили лиц мужского и женского пола имеют определенные различия. Так, полученная конфигурация личностного профиля обучающихся мужского пола очень близка конфигурации усредненного личностного

профиля летчика-истребителя, представленной в исследованиях В.А. Бодровым и Н.Ф. Лукьяновой [6]. Как и летчиков-истребителей, обучающихся мужского пола характеризует активность, энергичность, чувство соперничества, выраженная экстраверсия. Обучающимся мужского пола свойственны стремление к лидерству, высокая самооценка и уровень притязаний (высокие показатели 9-й, 8-й и 4-й шкал). В профиле опытных летчиков присутствует нерезкое повышение по 7-й шкале, что говорит о хорошем контроле со стороны интеллекта над импульсивностью и склонностью к риску [6]. У обследованных обучающихся такого контроля не наблюдается, что вполне характерно для их возрастного периода. Профиль обучающихся женского пола характеризуется сочетанием высоких показателей по шкалам 4-й, 5-й и 9-й, что отражает пониженный уровень интериоризации социальной нормы. Интерес вызывают достоверно высокие показатели ($p < 0,05$) по шкале «мужественность/женственность», указывающие на чрезмерную маскулинность обучающихся женского пола, что характеризует их как выносливых, самоуверенных, проявляющих мужской тип социальной адаптации, у них выражены такие черты как агрессивность, лидерские качества, стремление к индивидуальным достижениям. Очевидно, такие качества являются профессионально важными для девушек, осваивающих экстремальную профессию летчика [18]. Сходная картина наблюдается и в профессиональной спортивной деятельности. Высокие показатели по 5-й



Примечание: L – неискренность, ложь; F – достоверность; K – коррекция; 1 Hs – сверхконтроль; 2 D – пессимистичность, депрессия; 3 Hy – эмоциональная лабильность; 4 Pd – импульсивность; 5 Mf – мужественность/женственность; 6 Pa – ригидность; 7 Pt – тревожность; 8 Sc – индивидуальность; 9 Ma – активность и оптимизм; 0 Si – социальная интроверсия.

Рис 1. Усредненные профили обучающихся по данным методики СМЛ в исследуемых группах

шкале (выше 70 Т) особенно часто встречаются у таких спортсменов, у которых занятия спортом требуют максимальной мобилизации психических и физиологических ресурсов у спортсмена [4, с. 165]. Прежде всего, к таким видам спорта относятся спорт высших достижений, хоккей, футбол, бокс и различные виды борьбы, а также так называемые экстремальные виды спорта, в которых стали участвовать женщины в последние десятилетия. Как показывают наблюдения в спортивной психологии, чем более выражена у спортсменов маскулинность в физиологических и психологических качествах, тем больших спортивных результатов они добиваются [9, 12]. Обнаруживаемое сходство гендерных особенностей у обучающихся женского пола и у спортсменов позволяет предположить о близости воздействующих экстремальных условий в спорте и авиации. Так, исследование гендерной идентичности у обучающихся летного училища женского пола установило у них выраженность характеристик маскулинного типа [5, 18].

В дальнейшем было проведено исследование корреляционной связи выделенных гендерных особенностей обучающихся с успешностью учебной деятельности и летного обучения. В качестве показателей внешнего критерия были использованы рейтинговые оценки летных инструкторов за прохождение летной практики и экспертные оценки преподавателей за учебную успешность. Как показал результат проведенной линейной корреляции, была установлена определенная связь личностных характеристик с экспертными оценками за учебную деятельность и за летную практику обучающихся мужского и женского пола, что отражено в табл. 1 и 2.

Как следует из данных табл. 1, в группе обучающихся женского пола наиболее высокое значение коэффициента корреляции получено по связи успешности учебной деятельности со шкалой «ригидность» ($r = 0,576$). С успешностью учебной деятельности по экспертной оценке преподавателей связаны такие качества обучающихся женского пола, как стремление следовать установленным правилам, педантичность, любовь к аккуратности, точность, практичность, исполнительность, добросовестность, осмотрительность. Негативное влияние на успешность учебной деятельности могут оказывать такие качества, как чрезмерная активность, неустойчивость интересов, завышенная самооценка, стремление к поиску «острых ощущений» (отрицательная связь со шкалой «активность и оптимизм»).

У обучающихся мужского пола устанавливаются прямые корреляционные связи показателей успешности в учебе с личностными характеристиками по таким шкалам, как «социальная интроверсия» ($r = 0,431$),

«индивидуалистичность» ($r = 0,425$), «сверхконтроль» ($r = 0,402$). Показатели успешности в учебе обучающихся мужского пола были связаны со следующими качествами: сдержанность в эмоциональных проявлениях, речевых высказываниях, умеренность в общении и поведении, пассивность личностной позиции, эмоциональная сдержанность, избирательность в контактах, рационалистичность, умение подчиняться установленному порядку, следовать инструкциям, исполнительность, добросовестность, осмотрительность. А негативное влияние на успешность учебной деятельности могут оказывать такие личностные качества, как чрезмерная активность, неустойчивость интересов, завышенная самооценка, стремление к поиску «острых ощущений» (отрицательная связь со шкалой «активность и оптимизм»).

Проведенный корреляционный анализ показателей успешности летной подготовки, по оценке обучающихся летными инструкторами, и индивидуальных личност-

Табл. 1. Корреляция успешности учебной деятельности с личностными характеристиками по методике СМЛ (при $p < 0,05$)

Шкалы	Экспертная оценка за служебную деятельность	
	обучающиеся женского пола	обучающиеся мужского пола
1 Hs (сверхконтроль)	-0,075	0,402
2 D (депрессия, пессимистичность)	-0,183	0,195
3 Hy (эмоциональная лабильность)	0,259	0,262
4 Pd (импульсивность)	0,101	-0,118
5 Mf (мужественность/женственность)	-0,010	-0,009
6 Pa (ригидность)	0,576	0,199
7 Pt (тревожность)	-0,273	0,204
8 Sc (индивидуалистичность)	-0,054	0,425
9 Ma (активность и оптимизм)	-0,395	-0,555
0 Si (социальная интроверсия)	-0,073	0,431

Табл. 2. Корреляция успешности летного обучения с личностными характеристиками по методике СМЛ (при $p < 0,05$)

Шкалы	Экспертная оценка за летную практику	
	обучающиеся женского пола	обучающиеся мужского пола
1 Hs (сверхконтроль)	0,071	-0,210
2 D (депрессия, пессимистичность)	0,065	-0,198
3 Hy (эмоциональная лабильность)	-0,066	-0,347
4 Pd (импульсивность)	0,190	-0,357
5 Mf (мужественность/женственность)	0,400	-0,073
6 Pa (ригидность)	-0,089	-0,170
7 Pt (тревожность)	-0,101	-0,216
8 Sc (индивидуалистичность)	-0,159	-0,105
9 Ma (активность и оптимизм)	-0,345	-0,116
0 Si (социальная интроверсия)	0,525	0,310

ных характеристик обучающихся мужского и женского пола позволил установить ряд связей между исследуемыми показателями, что отражено в табл. 2.

Как визуализировано в табл. 2, в выборке обучающихся женского пола наиболее высокие значения коэффициента корреляции получены по связям успешности летного обучения со шкалами «социальная интроверсия» ($r = 0,525$) и «мужественность/женственность» ($r = 0,400$). Отрицательная корреляционная связь выявлена между экспертной оценкой и шкалой «активность и оптимизм». Следовательно, успешность летного обучения лиц женского пола связана с мужским типом поведения, а негативное влияние установлено у таких качеств, как чрезмерная активность, стремление к поиску «острых ощущений», завышенная самооценка (табл. 2).

Негативное влияние на успешность летной практики лиц мужского пола, по оценкам летных инструкторов, могут оказывать такие личностные характеристики, как эмоциональная неустойчивость, демонстративность поведения, неустойчивость самооценки («эмоциональная лабильность»), непродуманность поступков, склонность к риску, сниженный самоконтроль («импульсивность»). Положительная корреляционная связь в группе обучающихся мужского пола выявлена со шкалой «социальная интроверсия» ($r = 0,310$), что свидетельствует о значимости для успешности летного обучения сдержанности в эмоциональных проявлениях, речевых высказываниях, умеренности в общении и поведении (табл. 2).

На следующем этапе работы было проведено исследование влияния на успешность обучения личностных характеристик обучающихся мужского и женского пола, полученных по методике 16-факторный личностный опросник (16-ФЛЮ). Было проведено исследование корреляционных связей показателей характеристик по данной методике с эффективностью учебной деятельности по оценкам преподавателей и с успешностью летной практики по оценке летных инструкторов. Как показал проведенный корреляционный анализ, выявлено конгруэнтное сходство корреляции показателей личностных характеристик, полученных как с применением методики СМИЛ, так и методики 16-ФЛЮ, с успешностью обучения в летном училище.

Заключение. Таким образом, анализ проведенных исследований позволяет выделить гендерные особенности личностных характеристик, коррелирующие с успешностью обучения в летном училище у лиц мужского и женского пола, которые проявляются в виде комплекса личностных характеристик. Установлено, что на успешность учебной деятельности и летной подготовки влияют как одинаковые, так и различающиеся личностные качества у обучающихся мужского и женского пола. Кроме того, установленные личностные характеристики у обучающихся лиц мужского и женского пола летного училища могут оказывать как благоприятное, так и негативное влияние на успешность их учебной деятельности и летной подготовки. Прежде чем рекомендовать выявленные гендерные личностные особенности использовать в качестве критериев в процессе ППО и професси-

онально-психологического сопровождения, не следует забывать, что все пункты действующих авиационных инструкций, методических указаний и рекомендаций многократно проверены и основываются «на крови» в практике летного труда. Вследствие этого, необходима осторожность и тщательная экспериментальная проверка каждого пункта рекомендаций и нововведений в авиации [8, 17, 23]. В соответствии с изложенным, есть основания для проведения репрезентативных исследований с целью уточнения степени корреляции выявленных гендерных личностных особенностей обучающихся с успешностью/неуспешностью их летного обучения с целью последующей разработки рекомендации по гендерной специфике обучения в летном училище.

Библиографический список

1. Алексеев С.В. Женщины и армия: учебное пособие / С.В. Алексеев, С.П. Данченко, Г.А. Костецкая. М.: ИНФРА-М, 2022. 208 с.
2. Алексеенко М.С. Личностный потенциал в практике психологического обеспечения летной деятельности // Психология и Психотехника. 2021. № 4. С. 111-131.
3. Благинин А.А. Психологический анализ ошибочных действий летного персонала // Образование и наука. 2009. № 6. С. 74-81.
4. Благинин А.А., Бар Н.С., Котов О.В. Исследование личности в психологии и физиологии: учебно-методическое пособие. СПб.: ЛГУ им. А.С. Пушкина, 2016. 324 с.
5. Благинин А.А., Емельянов Ю.А., Лапшина Т.А. и др. Женщина летчик высокоманевренной авиации (анализ литературы). В кн.: Материалы научно-практической конференции «Актуальные проблемы авиационной и космической медицины» / Под ред. Б.Н. Котива. СПб.: ВМедА, 2018. С. 29-34.
6. Бодров В.А., Лукьянова Н.Ф. Личностные особенности пилотов и профессиональная эффективность // Психол. журн. 1981. Т. 2. № 2. С. 51-65.
7. Бурлачук Л.Ф. Словарь-справочник по психодиагностике: 3-е изд. СПб.: Питер, 2007. 688 с.
8. Гандер Д.В., Ворона А.А., Пономаренко В.А., Алексеенко М.С. Методологические и теоретические предпосылки психологических исследований летного труда на современном этапе развития авиации // Психология и Психотехника. 2016. № 11. С. 906-912. DOI: 10.7256/2454-0722.2016.11.22442
9. Дамадаева А.С. Гендерные исследования в спортивной психологии // Психологический журнал. 2012. Т. 33. № 1. С. 40-49.
10. Золотых В.И. Об уровнях авиационной системы и структуре системы безопасности полетов авиационной воинской части // Воздушно-космические силы. Теория и практика. 2019. № 11. С. 15-23.
11. Иванович А. Эфиопия – Эритрея: Уроки воздушной войны // Авиация и время. 2009. № 4. С. 40-46.
12. Иорданская Ф.А. Мужчина и женщина в спорте высших достижений (проблемы полового диморфизма): монография. М.: Советский спорт, 2012. 256 с.

13. Коновалов И.П. Войны Африканского Рога. Пушкино: Центр стратегической конъюнктуры, 2014. 192 с.

14. Крачко Э.А., Красильников Г.Т., Мальчинский Ф.В. Проблема профессиональной пригодности лиц женского пола к экстремальным, военным и летным профессиям. В кн.: Мат. XI Всероссийской научно-практической конференции (с иностранным участием). Краснодар: КВВАУЛ, 2021. С. 63-74.

15. Крачко Э.А., Красильников Г.Т., Мальчинский Ф.В. Анализ профессионально-важных качеств кандидатов женского пола, поступивших в военное летное училище // Вестник военного образования. 2021. № 5(32). С. 80-84.

16. Лапа В.В., Пономаренко В.А., Чунтул А.В. Психофизиология безопасности полетов. М.: МОО «Ассоциация журналистов пишущих на правоохранительную тематику», 2013. 396 с.

17. Мальчинский Ф.В., Крачко Э.А., Красильников Г.Т. Традиции и преемственность в развитии отечественной военно-авиационной психологии // Военная мысль. 2019. № 2. С. 97-107.

18. Медяникова Л.М., Горская Г.Б. Гендерная идентичность как фактор профессионального становления личности курсантов летного училища // Материалы ежегодной отчетной научной конференции аспирантов и соискателей Кубанского государственного университета физической культуры, спорта и туризма. 2022. № 1. С. 135-140.

19. Плотноков Н.И. Основания теории надежности человека-оператора (пилота) // Надежность. 2015. № 2(53). С. 90-93. DOI: 10.21683/1729-2646-2015-0-2-90-97

20. Пономаренко В.А. Психология духовности профессионала. М.: ПЕРСЭ, 2004. 256 с.

21. Пономаренко В.А. Психология человеческого фактора в опасной профессии. Красноярск: «Поликом», 2006. 629 с.

22. Пономаренко В.А. Безопасность полета – боль авиации. М.: Флинта, 2007. 416 с.

23. Пономаренко В.А. Научный вклад психологии и авиационной медицины в профессионализм авиаторов. М.: Когито-Центр, 2017. 295 с.

24. Собчик Л.Н. Стандартизированный многофакторный метод исследования личности СМЛ. СПб.: Речь, 2000. 219 с.

25. Юнкеров В.И., Григорьев С.Г. Математико-статистическая обработка данных медицинских исследований. СПб.: ВМедА, 2005. 292 с.

References

1. Alekseev S.V., Danchenko S.P., Kostetskaya G.A. [Women and the Army: a study guide]. Moscow: INFRA-M; 2022. (in Russ.)

2. Alekseenko M.S. [Personal potential in the practice of psychological support of flight activities]. *Psychology and Psychotecnics* 2021;4:111-131. (in Russ.)

3. Blaginin A.A. [Psychological analysis of erroneous actions by flight personnel]. *The education and science journal* 2009;6:74-81. (in Russ.)

4. Blaginin A.A., Bar N.S., Kotov O.V. [Character research in psychology and physiology: a study guide]. Saint Petersburg: Pushkin Leningrad State University; 2016. (in Russ.)

5. Blaginin A.A., Yemelianov Yu.A., Lapshina T.A. et al. [A female pilot of highly manoeuvrable aviation (a literature review). In: [Kotiv B.N., editor. Proceedings of the Science and Practise Conference Topical Matters of Aviation and Space Medicine]. Saint Petersburg: VMedA; 2018. P. 29-34. (in Russ.)

6. Bodrov V.A., Lukianova N.F. [Personal characteristics of pilots and professional efficiency]. *Psikhologicheskyy zhurnal* 1981;2(2):51-65. (in Russ.)

7. Bulachiuk L.F. [Reference dictionary in psychodiagnostics: 3rd edition]. Saint Petersburg: Piter; 2007. (in Russ.)

8. Gander D.V., Vorona A.A., Ponomarenko V.A., Alekseenko M.S. [Methodological and theoretical background of the psychological research of flight work at the current stage of aviation development]. *Psychology and Psychotecnics* 2016;11:906-912. DOI: 10.7256/2454-0722.2016.11.22442. (in Russ.)

9. Damadaeva A.S. [Gender research in sport psychology]. *Psikhologicheskyy zhurnal* 2012;33(1):40-49. (in Russ.)

10. Zolotykh V.I. [On the levels of an aviation system and structure of the flight safety system of an air force base]. *Vozdushno-kosmicheskiye sily. Teoria i praktika* 2019;11:15-23. (in Russ.)

11. Ivanovich A. [Ethiopia – Eritrea: Lessons of an air war]. *Aviatsiya i vremya* 2009;4:40-46. (in Russ.)

12. Iordanskaya F.A. [Men and women in high-level sports (matters of sexual dimorphism): a monograph]. Moscow: Sovetsky sport; 2012. (in Russ.)

13. Konovalov I.P. [Wars of the Horn of Africa]. Pushkino: Tsentr strategicheskoy koniunktury; 2014. (in Russ.)

14. Krachko E.A., Krasilnikov G.T., Malchinsky F.V. [The matter of professional aptitude of females in extreme, military, and flight professions]. In: [Proceedings of the XI All-Russian Science and Practice Conference (with foreign participants)]. Krasnodar: KVVAUL; 2021. P. 63-74. (in Russ.)

15. Krachko E.A., Krasilnikov G.T., Malchinsky F.V. [Analysis of professionally important qualities of female candidates admitted to a military flight school]. *Vestnik voennogo obrazovaniya* 2021;5(32):80-84. (in Russ.)

16. Lapa V.V., Ponomarenko V.A., Chuntul A.V. [Psychophysiology of flight safety]. Moscow: [Association of Law Enforcement Journalists]; 2013. (in Russ.)

17. Malchinsky F.V., Krachko E.A., Krasilnikov G.T. [Traditions and continuity in the development of the domestic military aviation psychology]. *Voennaya mysl* 2019;2:97-107. (in Russ.)

18. Medianikova L.M., Gorskaya G.B. [Gender identity as a factor of personal professional formation of flight school students]. In: [Proceedings of the Yearly Reporting Science Conference of Postgraduate and External Doctorate Students of the Kuban State University of Physical Education, Sports and Tourism] 2022;1:135-140. (in Russ.)

19. Plotnikov N.I. The bases of human-operator dependability theory. *Dependability* 2015;(2):90-97. DOI: 10.21683/1729-2646-2015-0-2-90-97.

20. Ponomarenko V.A. [A professional's spiritual psychology] Moscow: PER SE; 2004. (in Russ.)

21. Ponomarenko V.A. [The psychology of the human factor in a hazardous occupation]. Krasnoyarsk: Polikom; 2006. (in Russ.)

22. Ponomarenko V.A. [Flight safety, the pain of aviation] Moscow: Flinta; 2007. (in Russ.)

23. Ponomarenko V.A. [The scientific contribution of psychology and aeronautical medicine into the professionalism of the aviators]. Moscow: Kogito-Tsent; 2017. (in Russ.)

24. Sobchik L.N. [The SMIL standardised multi-factor method of character research]. Saint Petersburg: Rech; 2000. (in Russ.)

25. Yunkerov V.I., Grigoriev S.G. [Mathematical and statistical processing of medical research data]. Saint Petersburg: VMedA; 2005. (in Russ.)

Сведения об авторах

Красильников Геннадий Тимофеевич – доктор медицинских наук, профессор, старший научный сотрудник научно-исследовательского отдела, Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова», ул. Дзержинского, 135, Краснодар, Российская Федерация, 350090, e-mail: gennadykras@mail.ru

Крачко Эльвира Адисовна – кандидат медицинских наук, начальник научно-исследовательской лаборатории (медико-психологической коррекции и реабилитации) научно-исследовательского отдела, «Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова», ул. Академика Лебедева, д. 6, Санкт-Петербург, Российская Федерация, 194044, e-mail: elvira.krachko@yandex.ru

Мальчинский Федор Валентинович – кандидат психологических наук, начальник научно-исследовательского отдела, «Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова», ул. Дзержинского, 135, Краснодар, Российская Федерация, 350090, e-mail: nil.pfl@yandex.ru

Додова Людмила Муратовна – кандидат психологических наук, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории, Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова», ул. Дзержинского, 135, Краснодар, Российская Федерация, 350090, e-mail: dodovalm@mail.ru

Медяникова Людмила Михайловна – начальник научно-исследовательской лаборатории, «Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков имени Героя Советского Союза А.К. Серова» ул. Дзержинского, 135, Краснодар, Российская Федерация, 350090, e-mail: mlm22@mail.ru

About the authors

Gennady T. Krasilnikov, Doctor of Medicine, Professor, Senior Researcher, Scientific Research Department, Hero of the Soviet Union A.K. Serov Krasnodar Higher Aviation School of Pilots, 135 Dzerzhinskogo Str., Krasnodar, 350090, Russian Federation, e-mail: gennadykras@mail.ru.

Elvira A. Krachko, Candidate of Medicine, Head of Scientific Research Laboratory (of Medical Psychological Correction and Recovery), Research Department, S.M. Kirov Military Medical Academy, 6 Akademika Lebedeva Str., Saint-Petersburg, 194044, Russian Federation, e-mail: elvira.krachko@yandex.ru.

Fedor V. Malchinsky, Candidate of Psychology, Head of Scientific Research Department, Hero of the Soviet Union A.K. Serov Krasnodar Higher Aviation School of Pilots, 135 Dzerzhinskogo Str., Krasnodar, 350090, Russian Federation, e-mail: nil.pfl@yandex.ru.

Liudmila M. Dodova, Candidate of Psychology, Researcher, Scientific Research Laboratory, Hero of the Soviet Union A.K. Serov Krasnodar Higher Aviation School of Pilots, 135 Dzerzhinskogo Str., Krasnodar, 350090, Russian Federation, e-mail: dodovalm@mail.ru.

Liudmila M. Medianikova, Head of Scientific Research Laboratory, Hero of the Soviet Union A.K. Serov Krasnodar Higher Aviation School of Pilots, 135 Dzerzhinskogo Str., Krasnodar, 350090, Russian Federation, e-mail: mlm22@mail.ru.

Вклад авторов в статью

Автор **Красильников Г.Т.** – обзор и анализ существующего состояния рассматриваемой проблемы. Теоретическая составляющая работы, разработка дизайна исследования гендерных особенностей личности курсантов, анализ результатов исследования их влияния на успешность теоретического и летно практического обучения. Заключение и выводы.

Автор **Крачко Э.А.** – обзор и анализ существующего состояния рассматриваемой проблемы. Теоретическая составляющая работы, участие в разработке дизайна исследования, проведение исследований гендерных особенностей курсантов и влияния этих особенностей на успешность их обучения, статистическая обработка полученных результатов, заключение и выводы.

Автор **Мальчинский Ф.В.** – обзор и анализ существующего состояния рассматриваемой проблемы, участие в разработке дизайна исследования, организация проведения исследования влияния гендерных особенностей курсантов на успешность обучения. Анализ результатов исследования.

Автор **Додова Л.М.** – проведение исследования гендерных особенностей курсантов летного училища и их влияния на успешность обучения.

Автор **Медяникова Л.М.** – проведение исследования гендерных особенностей курсантов летного училища и их влияния на успешность обучения.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Обнаружение системных дефектов цифровых устройств при имитации неисправностей с применением фаззинга

Detecting system defects of digital devices in the course of malfunction imitation using fuzzing

Панков Д.А.¹, Панков И.А.^{2*}
Pankov D.A.¹, Pankov I.A.^{2*}

¹АО «ОНИИП», Омск, Российская Федерация, ²Омский государственный технический университет, Омск, Российская Федерация

¹AO ONIIP, Omsk, Russian Federation, ²Omsk State Technical University, Omsk, Russian Federation

*pankovddd@ya.ru



Панков Д.А.



Панков И.А.

Резюме. Цель. В статье предложены подходы к организации испытаний цифровых систем с помощью имитации неисправностей для выполнения требований международных и отечественных стандартов по обеспечению устойчивости к отказам и сбоям с целью эффективного (по времени) поиска дефектов ПО для выпуска серийных изделий. Предлагается структура и алгоритм работы программно-аппаратного стенда имитации неисправностей для проведения испытаний устройств комплекса. Стенд реализует сбор и подготовку данных для фаззинга, выявления ошибок на аппаратном уровне, а также определение объема испытаний. **Методы.** Применялись основы системного анализа, классические методы теории вероятности и математической статистики, теории принятия решений, методы тестирования и разработки программно-аппаратных систем, математическая теория нечетких множеств и нечеткой логики. **Результаты.** Разработаны алгоритмы имитации неисправностей для тестирования программно-аппаратных систем с помощью техники фаззинга, обеспечивающие вероятностную оценку момента окончания испытаний по тестированию с заданной точностью. **Выводы.** Данный набор алгоритмов позволяет обнаружить системные дефекты при объединении программных и аппаратных средств в единый комплекс, приводящему к возникновению новых неисправностей (свойство эмерджентности), которые невозможно учесть на этапе проектирования.

Abstract. Aim. The paper proposes approaches to the organisation of testing of digital systems through malfunction imitation for the purpose of ensuring compliance of international and Russian failure and fault resistance standards for the purpose of efficient (in terms of time) detection of software defects as part of mass production of products. The paper proposes a structure and operating algorithm of a hardware and software test bed for malfunction simulation intended for testing a system's devices. The test bed collects and processes data for fuzzing, hardware error identification, as well as defines the scope of testing. **Methods.** The paper used basic systems approach, classical methods of the probability theory and mathematical statistics, decision theory, methods of hardware and software testing and development, mathematical theory of fuzzy sets and fuzzy logic. **Results.** Malfunction simulation algorithms were developed for the purpose of testing hardware and software systems using fuzzing that ensure probabilistic estimation of the termination time of testing with a specified accuracy. **Conclusions.** The above set of algorithms allows detecting system defects in the process of software and hardware integration into a single system that cause new malfunctions (emergence) that cannot be taken into consideration at the design stage.

Ключевые слова: имитация неисправностей, отказы и сбои программно-аппаратных систем, тестирование программного обеспечения, устойчивость к отказам и сбоям, фаззинг.
Keywords: malfunction imitation, failures and faults of hardware and software systems, software testing, failure and fault resistance, fuzzing.

Для цитирования: Панков Д.А., Панков И.А. Обнаружение системных дефектов цифровых устройств при имитации неисправностей с применением фаззинга // Надежность. 2023. №4. С. 51-58. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-4-51-58>

For citation: Pankov D.A., Pankov I.A. Detecting system defects of digital devices in the course of malfunction imitation using fuzzing. Dependability 2023;4:51-58. <https://doi.org/10.21683/1729-2646-2023-23-4-51-58>

Поступила: 08.05.2023 / **После доработки:** 27.10.2023 / **К печати:** 20.11.2023
Received on: 08.05.2023 / **Upon revision:** 27.10.2023 / **For printing:** 20.11.2023

Введение

Согласно стандарту РФ для вычислительной техники Р 56939-2016 «Защита информации. Разработка безопасного программного обеспечения» и приказу ФСТЭК России № 76 от 02.06.2020 года для программно-аппаратных систем необходимо применять статический и динамический анализ кода программ, фаззинг-тестирование, а также проводить проверку на уязвимости и недеklarированные возможности ПО. Однако в ряде случаев использование инструментов фаззинга не позволяет обнаружить дефекты ПО и системные ошибки и не эффективнее классического тестирования программ [1]. Под фаззингом понимают специальную технику поиска ошибок в программном обеспечении, нацеленную на их проявление при искажении входных данных. Тем не менее, современные программы фаззинга сложно адаптировать под существующие комплексы, что подтверждается поддержкой подобных проектов научными институтами (ИСП РАН – разработка стендов для программ комплексов с ОС Astra Linux), а также обеспечить эффективность поиска системных ошибок не отдельно в тестовой среде, а при загрузке пользовательских программ в реальную аппаратную среду устройства (в устройство с набором микроконтроллеров).

Поскольку ведущие ученые в области отказоустойчивости сложных систем утверждают [2], что существуют лишь частичные меры по повышению устойчивости устройств с ПО к отказам и сбоям, то можно выделить два направления процесса разработки [3]. Если рассмотреть фаззинг со смысловой, а не терминологической составляющей, то прототипами методики, из которой появилась техника фаззинга, можно считать системы «UDS» и «JPL-STAR», разработанные в Лаборатории реактивного движения Массачусетского технологического университета в период 1961-1972 гг., где, как считается, впервые была построена самовосстанавливающаяся (лабораторная, демонстрационная) система, получившая название «JPL-STAR» [2]. Эта система ориентирована на технологию биполярных элементов с малым и средним уровнем интеграции и памятью на цилиндрических магнитных доменах. В макете «JPL-STAR» для ОЗУ устройства производилась имитация неисправностей регулируемой длительности – с 0 на 1 и наоборот, причем этот эксперимент показал самовосстановление системы на высоком уровне.

Для проектирования надежных архитектур используют два направления [3]. К первому направлению относится построение качественной архитектуры систем, которая за счет избыточности подсистем защиты обеспечивает работоспособность при отказах и сбоях. Ко второму направлению относится изучение проектируемого объекта с помощью внесения ошибок для проявления отказов и сбоев в результате имитации неисправностей или при реальном тестировании, в рамках которого проводится имитация неисправностей с применением техники фаззинга. Интерес представляет

рассмотрение этих подходов совместно для понимания зон ответственности каждого подхода и их объединения для решения задачи повышения устойчивости устройств к отказам и сбоям.

Модели фаззинга основаны на имитации неисправностей с помощью искажения входных данных для тестируемого ПО. Искажение производится путем мутации существующих наборов данных и/или генерации новых данных с помощью встроенных в фаззеры алгоритмов. В отличие от статического анализа, рассматриваемый подход направлен на исследование программ в процессе их выполнения. Поскольку основной вопрос исследования при имитации неисправностей состоит в том, каким образом найти критические ошибки в области пространства ошибок (которые оказывают значимое влияние на поведение системы), то обычно совместно используют сразу несколько подходов для обеспечения требуемого результата.

Например, применяется *анализ чувствительности* (используются статистически часто применяемые сигналы или параметры для изучения реакции системы; сигналы, направленные на задействование определенной области ПО или режима работы), *обучение с подкреплением* для эффективного исследования пространства ошибок и поиска критических неисправностей, а также т.н. *анализ реализма* (с помощью сбора статистических показателей), при котором вводимые ошибки определяются на основе ранее обнаруженных дефектов, исправленных в макетных образцах.

Способы имитации неисправностей

Создание средств имитации неисправностей возможно на различных уровнях проектируемого устройства, таких как уровень входных данных X , внутреннего состояния Y_n , результатов работы устройства Z и т.д. (рис. 1). Для внесения искажений возможно использовать программные и аппаратные средства. Аппаратные средства представляют технические системы (контактные – интерфейс прямого доступа в память и бесконтактные – облучение микросхем памяти и т.д., которые воздействуют на систему на физическом уровне). Программные средства искажают значения памяти, регистров в ОЗУ и на интерфейсах обмена с компонентами системы.

Выбор аргументов или функции Ψ исправного устройства позволяет определить тип используемого имитатора неисправностей, который удовлетворяет требованиям к стоимости разработки и направленности поиска в проектируемой системе. Фаззинг является одним из вариантов имитации неисправностей, который использует компонент X для внесения искажений.

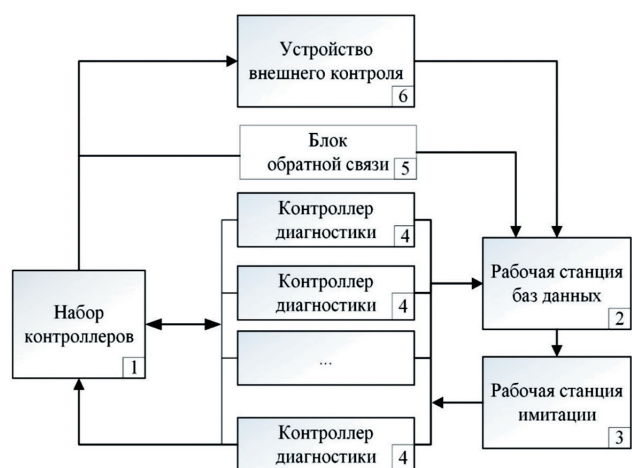
Эффективность поиска дефектов ПО с помощью фаззинга для программно-аппаратных систем зависит от подготовленных входных данных. Фаззинг может просто «зависнуть» на определенных путях программы, не находя новых ветвлений. Увеличение объема

тестируемого кода не всегда позволяет найти дефекты, так как они проявляются только в определенном наборе данных (проблема робастности).

ритм, который корректирует зоны применения алгоритма для увеличения скорости моделирования отказов и сбоев [5]. Набор испытаний реализован в алгоритме анализа проблемных ситуаций, возникающих при работе автоматизированной радиостанции, интегрируемой в действующую инфраструктуру цифровых сетей с множественным доступом, и реализует тестирование функций устройства с помощью техники фаззинга.

Алгоритм фаззинга дополняется предварительным разработанным статистическим анализом выполняемой программы и сбором данных перед проведением фаззинга в период приемо-сдаточных испытаний в рамках выполнения опытно-конструкторских работ. Алгоритм включает искажение входных данных с помощью устройства имитации неисправностей (модифицированный алгоритм фаззинга на основе сбора статистики о функциях работы устройства) и программный блок, который позволяет определить критерий окончания испытаний [6] с применением математической модели на основе нечеткого логического вывода (рис. 3 и 4).

2) формирование и загрузка исходных данных в микропроцессорное устройство;



53

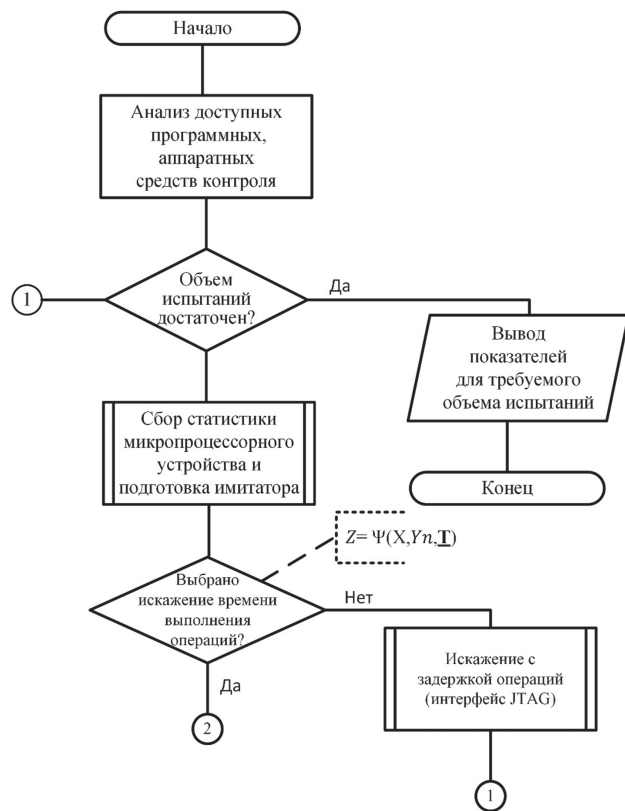


Рис. 3. Алгоритм анализа проблемных ситуаций устройства

- 3) подключение имитатора неисправностей и средств синхронизации для анализа и диагностики;
- 4) запуск управляющего стенда для проведения испытаний;
- 5) инициирование работы в основных режимах устройства;
- 6) проведение пошагового исследования для определения критерия окончания испытаний;
- 7) получение критерия окончания и косвенных признаков для критерия, параметров среднего времени наработки на отказ при проведении испытаний.

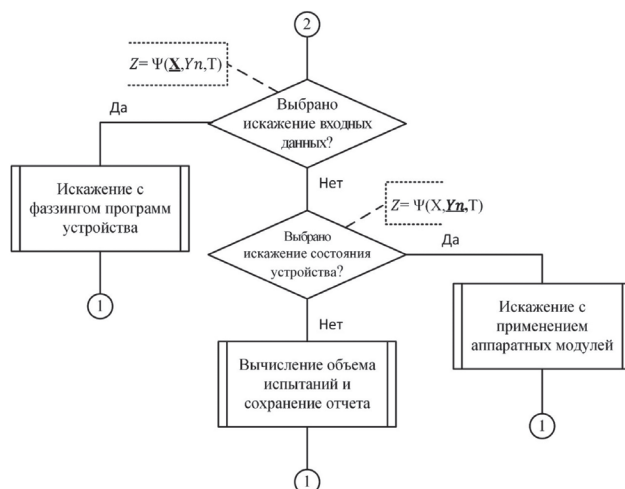


Рис. 4. Алгоритм анализа проблемных ситуаций устройства (продолжение)

Для осуществления данных пунктов в рамках методики производится ряд вычислений с помощью средств диагностики (на основе *JTAG*). Это позволяет автоматически выполнять диагностику технического состояния для дальнейшего устранения системных ошибок, проявляющихся при загрузке пользовательских программ в реальную аппаратную среду устройства (проявление свойства эмерджентности [6]).

Для испытания устройства важным является изучение свойств программы при ее эксплуатации на устройстве (в составе программно-аппаратного комплекса). Динамическими показателями программы является граф ветвлений программы, статистика эксплуатации ассемблерных команд и программных функций. Поскольку свойства программы зависят от режима работы устройства, то имеет смысл изучение свойств программы в рамках работы установленного режима. Следует отметить, что при разработке программ часто используют точки контроля. Под точкой контроля понимается текущий адрес памяти, для которого в момент времени выполнения возможно определить содержимое регистров и данных. Т.е. в точке контроля отклонение в значениях, хранимых в регистрах и памяти при различных входных данных минимально.

При сборе информации введем показатели, которые позволят сформировать статистику для режимов работы устройства (рис. 5 и 6):

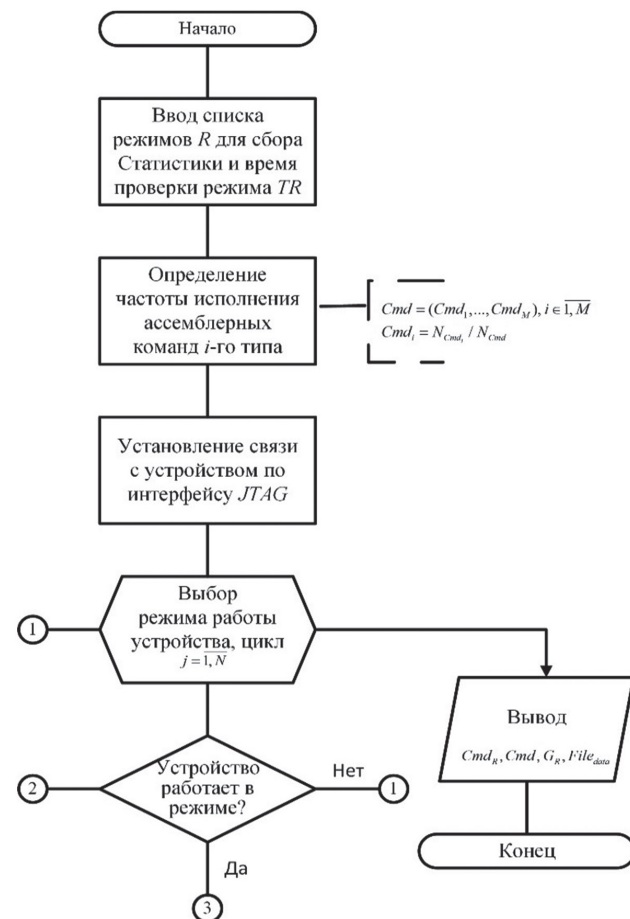


Рис. 5. Алгоритм предобработки исходных данных

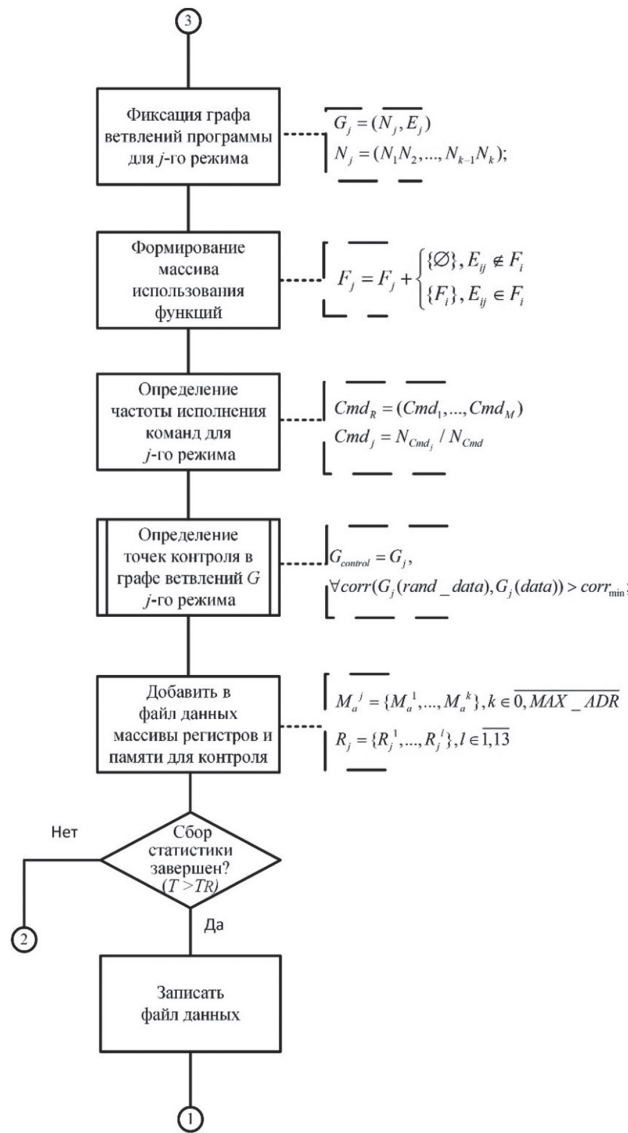


Рис. 6. Алгоритм предобработки исходных данных (продолжение)

Cmd_R – массив частот исполнения ассемблерных команд в заданном режиме;

Cmd – статический массив частот исполнения ассемблерных команд;

G_R – граф вызовов функций для выбранного режима;

M_a – массив состояний оперативной памяти микропроцессорного устройства;

R_j – массив состояния регистров микропроцессорного устройства;

ε_p – допустимая погрешность оценки среднего времени наработки на отказ;

T_R – время сбора статистики на одну программную функцию.

Сбор статистики производится в основных режимах работы устройства, для которых требуется обеспечить устойчивость к отказам и сбоям. Полученная статистика используется в качестве начальных данных для работы алгоритма фаззинга, который загружает шаблоны, позволяющие достигнуть узлов графа, где располагаются

основные функции, которые эксплуатируются при работе устройства в целевых режимах микропроцессорного устройства.

Граф ветвлений записывается для каждого шага работы алгоритма в виде файлового массива. Для массивов выполняется ранжирование. Ранжированные данные используются при загрузке в алгоритм фаззинга, что позволяет обойти ряд ограничений для алгоритма фаззинга, которые трудно реализуемы без модулей предварительного контроля и анализа реакции (или анализа параметров только программы без учета характеристик проектируемого устройства).

Результатом работы алгоритма является набор массивов данных, который передается эвристическому итерационному алгоритму фаззинга. За счет предобработанных массивов данных удастся достигнуть большего количества обнаруженных ошибок в режимах работы устройства. Стенд имитации интегрирован с системой разработки программного кода. В рамках данной системы используется подход по непрерывной интеграции, где стенд применяется при каждом релизе ПО.

Локализация места возникновения дефекта в программном коде, который реализует доступ к аппаратным модулям, является важным для обеспечения отказоустойчивости всего устройства. Для локализации зон ответственности каждой функции все ветвления отслеживаются с помощью средств анализа ветвлений (*control flow graph*). Если внутри ветвления используются функции доступа к аппаратным ресурсам, то возможно подключение контроля выполнения аппаратных средств в момент тестирования для зон, где сложно установить корректность работы на программном уровне. Процесс тестирования должен происходить внутри программной среды, которая хранит все тесты для версий и процесс правок после нахождения дефектов как программных, так и аппаратных компонентов.

Определение объема испытаний на стенде

Основной целью, достигаемой с помощью фаззинга, является выявление максимального числа ошибок за установленный временной лимит, а также увеличение числа рассмотренных ветвей графа программы. Как показано в работах ряда авторов, фаззинг позволяет решать задачу об оптимизации количества найденных уязвимостей за установленный временной диапазон [7]

$$\sum_{i=1}^N b_x \rightarrow \max. \quad (1)$$

Каждый отдельный сбой или отказ фиксируется для набора данных, который вызвал его возникновение

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, j\text{-й отказ включает } i\text{-й набор данных;} \\ 0, \text{ в противном случае.} \end{cases} \quad (2)$$

Определим признак обнаружения ошибки на тестовых данных, который фиксирует ошибки для уникальных программных функций

$$b_x = \begin{cases} 1, & \text{тогда и только тогда, когда } \exists i, j : f(c_{ij}) = x; \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (3)$$

При этом следует учесть ряд ограничений для выявления большего числа ошибок за установленное время поиска [8]:

$$\begin{aligned} \forall i, j : c_{i,j+1} &\leq c_{i,j}; \\ \sum_{i,j} c_{ij} \cdot t_{ij} &\leq t_{thres}; \\ \forall i, j : c_{ij} &\leq b_x, \text{ где } f(c_{ij}) = x; \\ \forall x : b_x &\leq \sum_{i,j} c_{ij}. \end{aligned} \quad (4)$$

Для подготовки данных перед проведением фаззинга используются описанные выше алгоритмы сбора тестовых данных, которые реализованы как самостоятельные программно-аппаратные средства. Поскольку проведение полного тестирования программы устройства может потребовать слишком много времени, фаззинг применяют к критическим режимам работы устройства. Для этого выделяется конечный набор функций, которые необходимо протестировать с возможностью оценки результата их выполнения. В результате работы алгоритма фаззинга на каждой итерации формируется матрица ветвлений, суммирующая количество переходов для каждой из вершин графа (рис. 7).

При этом мутации исходных данных нацелены на исследование отклонений реальной работы программы от ее алгоритма. Вариантом организации фаззинга является комбинация генерационного и мутационного искажения данных. Выбор типа искажения в конкретном случае производится на основе определяемой разработчиками стратегии тестирования. Для этого в алгоритме происходит динамический поиск и добавление новых условных переходов (ветвлений).

Архитектура ПО (обобщенная модель информационной системы) позволяет декомпозировать программу на подсистемы, которые проще контролировать в процессе работы. Поэтому контроль показателей (формула (5)) на каждом уровне подсистемы позволяет повысить качество за счет ускорения обнаружения отклонения системы по отклонению в поведении ее компонентов. Для спроектированной архитектуры часто используют определение коэффициента надежности ПО [2, 9]:

$$R = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} PU_{ij} R_{ij}, \quad (5)$$

где M – число уровней архитектуры ПО, N_j – число компонентов на j -м уровне, $j = 1, M$, PU_{ij} – вероятность использования компонента, R_{ij} – надежность компонента.

Для заданной архитектуры производится связывание времени наработки на отказ по уровням системы с вероятностью применения в конкретном случае работы устройства (формула (6)) [9]

$$\begin{aligned} MTTF = & \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_j} \left\{ PU_{ij} \cdot (1 - PF_{ij}) \cdot [TU_{ij} + \right. \\ & \sum_{m=1}^{N_m} \sum_{n=1}^{N_n} [(1 - PL_{nm}^{ij}) \cdot TU_{mn} + \sum_{i \in D_{nm}} ((1 - PL_{nm}^{ij}) \cdot TU_{lm} + \\ & \sum_{n=1}^{N_n} [(1 - PL_{nm}^{ij}) \cdot TU_{mn} + \sum_{i \in D_{nm}} [(1 - PL_{nm}^{ij}) \cdot TU_{lm}]] \\ & \left. \left. \left. \sum_{l \in D_{nm}} (1 - PL_{nm}^{ij}) \cdot TU_{lm} \right) \right] \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

где N_j – число компонентов на уровне j , $j \in \{1, \dots, M\}$;
 D_{ij} – множество индексов компонентов, зависящих от компонента i на уровне j , $i \in \{1, \dots, N_j\}$;
 PU_{ij} – вероятность использования компонента i на уровне j , $i \in \{1, \dots, N_j\}$, $j \in \{1, \dots, M\}$;
 PF_{ij} – вероятность сбоя в компоненте i на уровне j , $i \in \{1, \dots, N_j\}$, $j \in \{1, \dots, M\}$;
 PL_{nm}^{ij} – условная вероятность сбоя в компоненте m на уровне n при сбое в компоненте i на уровне j , $i \in \{1, \dots, N_j\}$, $j \in \{1, \dots, M\}$, $n \in \{1, \dots, N_m\}$, $m \in \{1, \dots, M\}$;

Стартовая матрица ветвлений NxN				Активация перехода в a ₂₂				Выполнение программы при работе устройства в режиме			
0	0	...	0	0	0	...	0	0	0xFF	...	0x7F
a ₁₁	a ₁₂		a _{1n}	a ₁₁	a ₁₂		a _{1n}	a ₁₁	a ₁₂		a _{1n}
0	0	...	0	0	1	...	0	0	0xF0	...	0x10
a ₂₁	a ₂₂		a _{2n}	a ₂₁	a ₂₂		a _{2n}	a ₂₁	a ₂₂		a _{2n}
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
0	0	...	0	0	0	...	0	0	0xFF	...	0
a _{n1}	a _{n2}		a _{nn}	a _{n1}	a _{n2}		a _{nn}	a _{n1}	a _{n2}		a _{nn}

Рис. 7. Матрица ветвлений для алгоритма фаззинга

TA_{ij} – время доступа к компоненту i на уровне $j, i \in \{1, \dots, N_j\}, j \in \{1, \dots, M\}$;

TC_{ij} – время анализа сбоя в компоненте i на уровне $j, i \in \{1, \dots, N_j\}, j \in \{1, \dots, M\}$;

TE_{ij} – время устранения сбоя в компоненте i на уровне $j, i \in \{1, \dots, N_j\}, j \in \{1, \dots, M\}$;

TU_{ij} – время использования компонента i на уровне $j, i \in \{1, \dots, N_j\}, j \in \{1, \dots, M\}$.

В результате оценки показателя $MTTF$ при разработке и тестировании производится корректировка программных и аппаратных модулей системы, после чего тестирование системы повторяется до появления необходимых параметров.

Момент окончания испытаний вычисляется с помощью вероятностного и статистического подхода [6]. Для нормального закона распределения вероятности наработки на отказ $MTTF$ можно перейти к ее оценке по частоте отказов и сбоев, определив нижнюю и верхнюю границу такой вероятности [4, 8]. Затем производится ее динамическая оценка на основе установленного в ТЗ времени между отказами ($MTTF$) устройства по формуле (7):

$$p_{1,2} = \frac{p^* + \frac{1}{2} \frac{t_\beta^2}{n} \pm t_\beta \sqrt{\frac{p^*(1-p^*)}{n} + \frac{1}{4} \frac{t_\beta^2}{n^2}}}{1 + \frac{t_\beta^2}{n}}, \quad (7)$$

где t_β – коэффициент для доверительной вероятности β , определяемый таблично, p^* – оценка вероятности по частоте, n – число измерений.

В результате экспериментальных исследований для 3-х режимов цифрового устройства с помощью имитатора неисправностей обнаружено на 82% больше неисправностей, чем при классическом тестировании (179 дефектов) [5].

Полученный объем испытаний, в результате которого установлена с заданной точностью необходимая вероятность наработки на отказ $MTTF$, считается достаточным для завершения испытаний по тестированию устройства с помощью фаззинга. Зная коэффициент надежности ПО R и доверительную оценку $MTTF$, можно локализовать зоны и режимы, которые в первую очередь требуется тестировать с помощью стенда имитации неисправностей.

Заключение

Поскольку используемые микропроцессорные элементы аппаратных средств относятся к классу высоконадежных изделий, то основной проблемой обеспечения работоспособности проектируемых устройств является выявление отказов, связанных с дефектами ПО, проявляемыми в реальной аппаратной среде. Разработана структура имитатора неисправностей с набором алгоритмов для ускорения поиска дефектов с помощью техники фаззинга. Определяется момент окончания испытаний с заданной точностью. За счет совмещения разработанных алгоритмов и техники фаззинга удалось выявить дефекты,

являющиеся сложно обнаруживаемыми классическими методами тестирования для режимов работы цифрового устройства комплекса.

В дальнейшем планируется синтезировать алгоритмы фаззинга с алгоритмами мультиверсионного контроля для отладки качества работы инструментов фаззинга на известных наборах ошибок.

Библиографический список

1. Козачок А.В. Козачок В.И., Осипова Н.С. и др. Обзор исследований по применению методов машинного обучения для повышения эффективности фаззинг-тестирования // Вестник ВГУ, серия: системный анализ и информационные технологии. 2021. № 4. С. 83-106.
2. Mathur F.P., Avižienis A. Reliability analysis and architecture of a hybrid-redundant digital system: Generalized triple modular redundancy with self-repair // Proceedings of the May 5-7, 1970, spring joint computer conference. 1970. Pp. 375-383.
3. Ковалев И.В. Анализ проблем в области исследования надежности программного обеспечения: многоэтапность и архитектурный аспект // Вестник СибГАУ. 2014. № 3. С. 78-92.
4. Патент № 2697629 Российская Федерация, МПК G06F 11/261. Устройство для имитации неисправностей в программно-аппаратных системах: № 2018105476 заявл. 13.02.18; опубл. 15.08.19 / Д.А. Панков; патентообладатель АО ОНИИП.
5. Панков Д.А., Панков И.А., Денисова Л.А. Автоматизация разработки и тестирования цифровых систем связи с многоуровневой архитектурой // Автоматизация в промышленности. 2023. № 1. С. 31-35.
6. Панков Д.А., Денисова Л.А. Проектирование программно-аппаратного комплекса: определение объема тестовых испытаний микропроцессорных устройств // Автоматизация в промышленности. 2020. № 12. С. 23-29. DOI: 10.25728/avtprom.2020.12.04
7. Rebert A., Cha S.K., Avgerinos T. et al. Optimizing seed selection for fuzzing // IEEE Access. 2018. Vol. 6. Pp. 861-875. URL: <https://www.usenix.org/conference/usenixsecurity14/technicalsessions/presentation/rebert> (дата обращения 08.05.2023)
8. Ушаков И.А. Надежность: прошлое, настоящее, будущее // Reliability: Theory & Applications. 2006. № 1. С. 17-25.
9. Русаков М.А. Многоэтапный анализ архитектурной надежности в сложных информационно-управляющих системах : дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2005. 168 с.

References

1. Kozachok A.V., Kozachok V.I., Osipova N.S. et al. Overview of studies on the application of machine learning methods to improve the efficiency of fuzzing testing. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technologies* 2021;4:83-106. (in Russ.)

2. Mathur F.P., Avižienis A. Reliability analysis and architecture of a hybrid-redundant digital system: Generalized triple modular redundancy with self-repair. *Proceedings of the May 5-7, 1970, spring joint computer conference*; 1970. P. 375-383.

3. Kovalev I.V. Analysis of problems in the research area of software reliability: a lot of stages and architectural aspect. *The Siberian Aerospace Journal* 2014;3:78-92. (in Russ.)

4. Pankov D.A. Patent no. 2697629 Russian Federation, MPK G06F 11/261. [Device for imitating malfunctions in hardware and software systems]: no. 2018105476 appl. 13.02.18; publ.15.08.19. Patent holder AO ONIIP. (in Russ.)

5. Pankov D.A., Pankov I.A., Denisova L.A. [Automation of the development and testing of digital telecommunication systems with multi-layer architecture]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* 2023;1:31-35. (in Russ.)

6. Pankov D.A., Denisova L.A. [Designing a hardware and software system: defining the scope of testing of computer-based devices]. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti* 2020;12:23-29. DOI: 10.25728/avtprom.2020.12.04. (in Russ.)

7. Rebert A., Cha S.K., Avgerinos T. et al. Optimizing seed selection for fuzzing. *IEEE Access* 2018;6:861-875. (accessed 08.05.2023). Available at: <https://www.usenix.org/conference/usenixsecurity14/technicalsessions/presentation/rebert>.

8. Ushakov I.A. [Reliability: past, present, future]. *Reliability: Theory & Applications* 2006;1:17-25.

9. Rusakov M.A. [Multistage analysis of the architectural reliability in complex information management systems: a Candidate of Engineering thesis]. Krasnoyarsk; 2005. (in Russ.)

Сведения об авторах

Панков Денис Анатольевич – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела по научно-технической работе АО «ОНИИП», г. Омск, Российская Федерация e-mail: pankovddd@yandex.ru

Панков Илья Анатольевич – аспирант ОмГТУ кафедры АСОИУ, г. Омск, Российская Федерация, e-mail: pankov99ai@yandex.ru

About the authors

Denis A. Pankov, Candidate of Engineering, Deputy Head of Research and Engineering Department, AO ONIIP, Omsk, Russian Federation, e-mail: pankovddd@yandex.ru.

Ilya A. Pankov, postgraduate student, OmSTU, Department of Automated Information Processing and Control Systems, Omsk, Russian Federation, e-mail: pankov99ai@yandex.ru.

Вклад авторов в статью

Авторами предложены подходы к организации испытаний цифровых систем с помощью имитации неисправностей и анализ объема испытаний с помощью нечеткого логического вывода и методов теории вероятности для выявления системных ошибок, проявляющихся в ПО. Показано направление внедрения фаззинга для оценки качества ПО.

Панков Д.А. предложил направление внедрения техники фаззинга и структуру имитации неисправностей для оценки качества ПО проектируемых систем, разработал алгоритм определения объема испытаний.

Панков И.А. разработал алгоритмы тестирования, а также провел экспериментальные исследования, выявил ограничения и затруднения, которые необходимо будет устранить для использования техник имитации неисправностей на уровне оборудования и программных средств разработки.

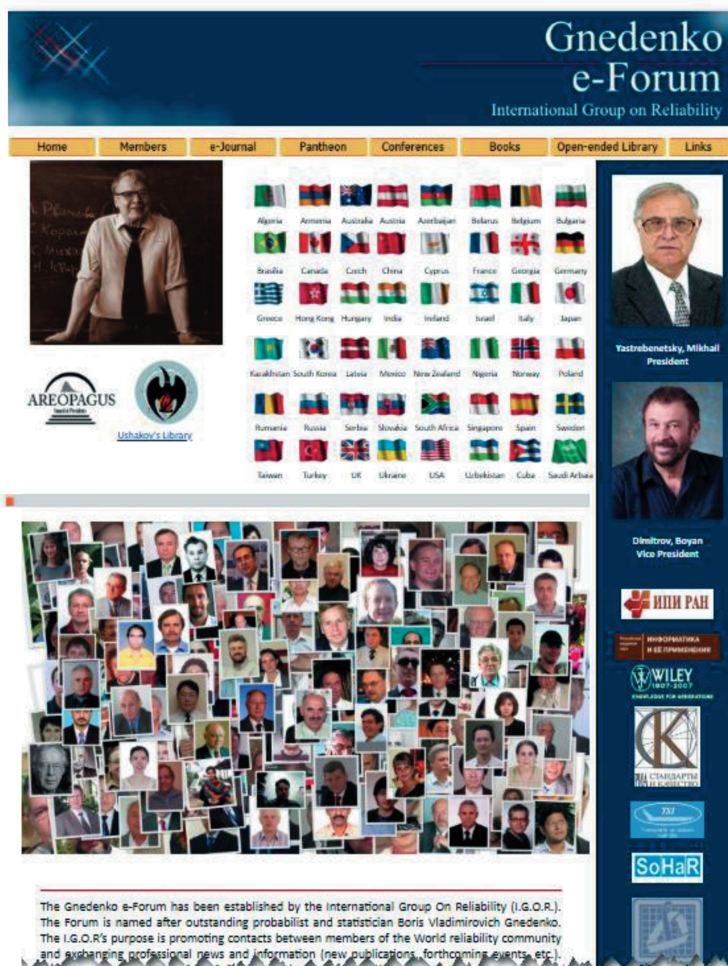
Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.



GNEDENKO FORUM

INTERNATIONAL GROUP ON RELIABILITY



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

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

Форум выступает в качестве объективного и нейтрального лица, распространяющего научную информацию для прессы и общественности по вопросам, касающимся безопасности, анализа риска и надёжности сложных технических систем. Он публикует 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

GUIDELINES FOR PUBLICATION IN THE JOURNAL «DEPENDABILITY»

■ STRUCTURAL DEPENDABILITY

THEORY AND PRACTICE

- Methods of calculation, technology and methods of simulation, application software packages, practical calculations of complex systems dependability.
- Mathematical theory of maintenance, practical results of complex systems operation, system lifecycle, optimization of dependability and costs at all lifecycle stages.
- Test methods, criteria of test-based decision-making, accelerated testing, methods of test-based dependability assessment of systems, practical experience of dependability testing.

■ FUNCTIONAL DEPENDABILITY

THEORY AND PRACTICE

- Object, subject and purposes of research, functional dependability indicators, terminology, principles and methods of calculation.
- Methods of assessment and prediction of software dependability, methods of calculation of information processes reliability in –hardware and software systems subject to faults, software/operator/input information errors.
- Technology and methods of functional dependability: technology of functionally dependable software design, methods of design of fault-tolerant and operator error-tolerant information processing and management algorithms, methods and ways of protection against input information errors, practical results.

■ FUNCTIONAL SAFETY OF SYSTEMS

THEORY AND PRACTICE

- Object, subject and purposes of research, functional safety indicators; safety functions, safety integrity, functional safety terminology.
- Mathematical methods and models of requirements definition for safety integrity and allowable time of hazardous failure detection, functional safety models of multichannel and multilevel systems.
- Technologies for ensuring functional safety of systems at all lifecycle stages.

■ FAULT TOLERANCE OF SYSTEMS

THEORY AND PRACTICE

- Methods of passive failure protection, mathematical models of structural redundancy, gradual degradation of redundant systems, fault masking, practical results of application of passive failure protection.

- Methods of active protection against structural failures and information process errors, principles and methods of active protection, theoretical foundations of active protection, technical solutions, efficiency assessment of active protection.

■ RISK MANAGEMENT

THEORY AND PRACTICE

- Postulates and principles of safety. Safety case. Methods and practical results of hazard ranking.
- Classification of item risks. Principles and methods of risk assessment. Risk assessment tools. Methods of acceptable risk levels definition. Risk management methodology. Management of operational, technology-related, fire, occupational, environmental risks.
- Integral risks. Methods and models of identification of integral risks of systems. Integral risks of processes. Integral risks of services.

■ CERTIFICATION AND STANDARDIZATION

THEORY AND PRACTICE

- Accreditation of certification bodies and test laboratories, state of the art in Russia and other countries. How to achieve mutual recognition of test results in Russia and other countries? Methods of certification of hardware and software systems for compliance with international functional safety standards.
- Mandatory and voluntary certifications: experience, opinions, suggestions.
- Certification of system quality and dependability: regulatory requirements, testing procedures, practical results.
- Effect of the law On Technical Regulation on the development of the theory and practice of dependability and functional safety.
- State of the art and development trends of standardization of dependability, fault tolerance and survivability, functional safety and risk management.

■ INNOVATIVE TECHNOLOGY

OF DEPENDABILITY AND SAFETY

THEORY AND PRACTICE

- Application of artificial intelligence-based methods in dependability and safety.
- Methods and models of Data Science.
- Algorithms of prediction of failures and hazardous events using Data Science.
- Methods of proactive dependability and safety management.

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 A4 с полями: левое, верхнее, нижнее – 2 см; правое – 1,5 или 2 см. Минимальный объем статьи – 5 страниц, максимальный (может быть увеличен по согласованию с редакцией) – 12 страниц. При этом статья включает структурные элементы, описание которых представлено ниже.

Структура материала статьи

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

1) Название статьи

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

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

Пример:

Повышение надежности электронных компонентов
The Increasing of dependability of electronic components

2) Фамилия И.О. автора (авторов)

Данный структурный элемент для каждого автора включает:

- на русском языке – его фамилию и инициалы, после которых указывается сноска в виде цифры, набранной верхним индексом (надстрочным), которая ссылается на указание места работы автора. У фамилии автора, который будет контактировать с редакцией, также верхним индексом (после цифры) указывается символ «*»;
- на английском языке – его фамилию, имя и отчество в формате «Имя, инициал отчества, фамилия» (Ivan I. Ivanov). Фамилию на английском языке необходимо указывать в соответствии с заграничным паспортом или так, как она была указана в ранее опубликованных статьях. Если автор не имеет заграничного

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

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

Пример:

Иванова А.А.¹, Петров В.В.^{2*}

Anna A. Ivanova, Victor V. Petrov

3) Место работы автора (авторов)

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

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

Пример:

¹Московский государственный университет, Российская Федерация, Москва

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

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

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

Пример:

*petrov_vv@aaa.ru

5) Резюме статьи

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

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

Пример (на рус. яз.):

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

6) Ключевые слова

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

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

Пример (на рус. яз.):

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

7) Текст статьи

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

Оформление:

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

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

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

где n – количество изделий.

Пример:

1. Состояние вопроса повышения надежности электронных компонентов

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

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

Рис. 2. Описание жизненно важных процессов

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

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

Табл. 2. Описание жизненно важных процессов

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

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

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

Формулы могут быть включены непосредственно в текст, например:

Пусть $y = a \cdot x + b$, тогда...

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

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

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

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

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

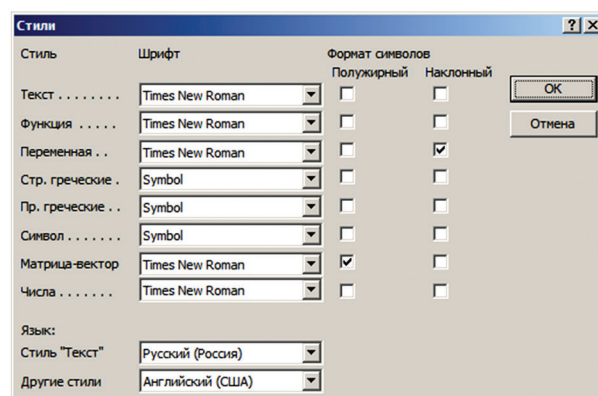
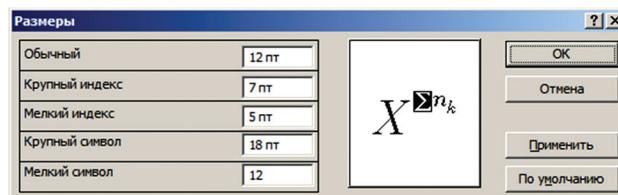
Простые формулы следует набирать без применения формульного редактора (использовать в MS Word русские и латинские буквы, а также меню «Вставка» + «Символ», если требуются греческие буквы и математические операторы), с соблюдением требуемого наклона для латинских символов, например:

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

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

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

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



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

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

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

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

8) Благодарности

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

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

Оформление:

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

9) Библиографический список

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

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

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

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

В описании каждого источника должны быть представлены все авторы.

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

Оформление:

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

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

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

10) Сведения об авторах

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

Оформление:

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

11) Вклад авторов в статью

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

Оформление:

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

12) Конфликт интересов

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

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

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

Оформление:

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