НАДЕЖНОСТЬ И КАЧЕСТВО СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

№ 1 (25) 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

Острейковский В. А., Лысенкова С. А., Шевченко Е. Н.
ФЕНОМЕН АСИММЕТРИИ ВНУТРЕННЕГО ВРЕМЕНИ С УЧЕТОМ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И НЕОБРАТИМОСТИ ПРОЦЕССОВ В ТЕОРИИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ 3

Бутусов О. Б., Дикусар В. В.
НОВЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ И ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ 11

Острейковский В. А., Лысенкова С. А., Шевченко Е. Н.
О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭФФЕКТА АСИММЕТРИИ ВРЕМЕНИ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ 21

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

Зеленцов Б. П., Трофимов А. С.
ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ ПРИ РАЗНЫХ СПОСОБАХ ЗАДАНИЯ ПЕРИОДИЧНОСТИ ПРОВЕРОК 35

Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Лысенко А. В., Подсякин А. С., Юрков Н. К.
ТЕХНОЛОГИЯ ИЗМЕРЕНИЯ АППЛИКАТЫ ВИБРАЦИОННОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАЗМЫТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ КРУГЛОЙ МЕТКИ 45

Адамова А. А., Аваева Л. Г., Лохтуров А. В.
АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ ИНТЕГРАЦИИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ С СЕТЬЮ ИНТЕРНЕТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАНДАРТА 6LoWPAN 54

Акимов А. А., Горячев Н. В., Дерябин Д. В., Прошин А. А., Рыжов А. А.
ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВАКУУМНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ 62

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Полтавский А. В., Юрков Н. К.
ОТБОР ОПЕРАТОРОВ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ РАБОЧИХ МЕСТ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫМ КОМПЛЕКСАМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ 70

Куатов Б. Ж., Коптев А. Н., Куртаев С. Ж., Мясникова Ю. В.
ЗАДАЧА СИНТЕЗА МОДЕЛИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ 77

Ибрагимов Б. Г., Гасанов А. Г., Алиева А. А., Исаев А. М.
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ НА БАЗЕ АРХИТЕКТУРНОЙ КОНЦЕПЦИИ БУДУЩИХ СЕТЕЙ 88

Калинцев А. С., Рубцов Е. А.
МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАБОЧЕЙ ОБЛАСТИ СРЕДСТВ АВИАЦИОННОЙ ЦИФРОВОЙ РАДИОСВЯЗИ МЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА 96

ОРГАНИЗАЦИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

Веревкина О. И.
РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГИБРИДНОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ РИСКОВ НАРУШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА РЕГИОНАЛЬНОМ И ЛИНЕЙНОМ УРОВНЯХ В ХОЗЯЙСТВЕ ПУТИ 106

RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

№ 1 (25) 2019

CONTENT

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY ISSUES AND QUALITY

Ostreykovskiy V. A., Lysenkova S. A., Shevchenko E. N.
PHENOMENON OF ASYMMETRY OF INTERNAL TIME, TAKING INTO ACCOUNT THE INSTABILITY AND IRREVERSIBILITY OF PROCESSES IN THE THEORY OF FORECASTING THE STATE OF COMPLEX DYNAMICAL SYSTEMS 3

Butusov O. B., Dikusar V. V.
A NEW METHOD FOR ANALYZING IMAGES AND TIME SERIES USING A POTENTIAL TRANSFORMATION 11

Ostreykovsky V. A., Lysenkova S. A., Shevchenko E. N.
ON THE POSSIBILITY OF USING THE EFFECT OF TIME ASYMMETRY IN PROBLEMS OF ESTIMATING THE DURABILITY OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS 21

TECHNOLOGICAL BASES OF IMPROVING THE RELIABILITY AND QUALITY OF PRODUCTS

Zelentsov B. P., Trofimov A. S.
RESEARCH MODELS OF RELIABILITY CALCULATION WITH DIFFERENT WAYS OF TASK THE PERIODIC INSPECTION 35

Grigorev A. V., Kochegarov I. I., Lysenko A. V., Podsyakin A. S., Yurkov N. K.
MEASUREMENT TECHNOLOGY APPLICATI VIBRATION DISPLACEMENTS BASED ON THE ANALYSIS OF DEFOCUS OF THE IMAGE OF A CIRCULAR MARK 45

Adamova A. A., Avaeva L. G., Lokhturov A. V.
ANALYSIS OF THE PROSPECTS FOR INTEGRATION OF WIRELESS SENSOR NETWORKS WITH THE INTERNET USING STANDARD 6LoWPAN 54

Akimov A. A., Goryachev N. V., Deryabin D. V., Proshin A. A., Ryzov A. A.
APPLICATION PROBLEMS OF VACUUM ELECTRONIC DEVICES 62

DIAGNOSTIC METHODS OF ENSURING THE RELIABILITY AND THE QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

Poltavsky A. V., Yurkov N. K.
SELECTION OF OPERATORS OF AUTOMATED WORKPLACES OF MULTIFUNCTIONAL COMPLEXES OF UNMANNED AERIAL VEHICLES 70

Kuatov B. Zh., Koptev A. N., Kurtaev S. Zh., Myasnikova Yu. V.
THE PROBLEM OF SYNTHESIS MODELS FOR CONTROL AND DIAGNOSTICS IN THE MANUFACTURE OF ELECTRICAL EQUIPMENT OF AIRCRAFTS 77

Ibragimov B. G., Gasanov A. G., Alieva A. A., Isaev A. M.
RESEARCH OF THE PERFORMANCE INDICATORS MULTISERVICE TELECOMMUNICATION NETWORKS BASED ON THE ARCHITECTURAL CONCEPT FUTURE NETWORKS 88

Kalintsev A. S., Rubtsov E. A.
THE METHOD OF CALCULATING THE WORKSPACE AERONAUTICAL DIGITAL RADIO METER RANGE 96

ORGANIZATION AND SAFETY OF ROAD TRAFFIC

Verevkina O. I.
THE RESULTS OF APPLYING THE HYBRID METHOD TO ASSESS FUNCTIONAL RISKS OF INFRINGEMENT OF SAFETY OF TRAFFIC ON THE REGIONAL AND LINEAR LEVELS ON THE FARM PATH 106

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY ISSUES AND QUALITY

УДК 517.98:519.2:621.039 DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-1

В. А. Острейковский, С. А. Лысенкова, Е. Н. Шевченко

ФЕНОМЕН АСИММЕТРИИ ВНУТРЕННЕГО ВРЕМЕНИ С УЧЕТОМ НЕУСТОЙЧИВОСТИ И НЕОБРАТИМОСТИ ПРОЦЕССОВ В ТЕОРИИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

V. A. Ostreykovskiy, S. A. Lysenkova, E. N. Shevchenko

PHENOMENON OF ASYMMETRY OF INTERNAL TIME, TAKING INTO ACCOUNT THE INSTABILITY AND IRREVERSIBILITY OF PROCESSES IN THE THEORY OF FORECASTING THE STATE OF COMPLEX DYNAMICAL SYSTEMS

Аннотация. *Актуальность и цели*. Для повышения надежности и безопасности сложных критически важных систем при их длительной эксплуатации возникает необходимость использования современных подходов к оценке ресурса и срока службы с учетом эффекта асимметрии времени «прошлое – настоящее – будущее». *Материалы и методы*. Для реализации этой идеи проведен анализ расчета показателей долговечности по традиционным критериям длительной прочности и вероятностно-статистическим методам для систем, у которых искомый ресурс и срок службы составляет 30–50 и более лет, изготавливаемых малыми сериями, а иногда и вообще в единичных экземплярах. Показано, что использование современных методов функционального анализа может повысить точность прогноза состояния сложных макроскопических технических систем. *Результаты и выводы*. Сделаны выводы о возможности повышения характеристик надежности и безопасности СФСС при применении нового подхода, учитывающего фактор асимметрии времени в теории долговечности сложных технических систем. Например, основным теоретическим фундаментом является оценка внутреннего времени функционирования систем.

Abstract. *Background*. To increase the reliability and safety of complex critical systems during their long-term operation, it becomes necessary to use modern approaches to estimating the life and service life, taking into account the effect of time-past-present-future asymmetry. *Materials and methods.* To realize this idea, the analysis of calculation of longevity indicators by traditional criteria of long-term strength and probabilistic-statistical methods for systems in which the required life and service life is 30–50 years or more, produced in small series, and sometimes even in single copies. It is shown that the use of modern methods of functional analysis can improve the accuracy of the forecast of the state of complex macroscopic technical systems. *Results and conclusions.* Conclusions are made about the possibility of increasing the reliability and safety characteristics of the SSSF in applying a new approach that takes into account the time asymmetry factor in the theory of durability of complex technical systems. For example, the main theoretical foundation is the evaluation of the internal time of the functioning of systems.

© Острейковский В. А., Лысенкова С. А., Шевченко Е. Н., 2019

Ключевые слова: асимметрия времени, неустойчивость, необратимость, ресурс, срок службы.

Keywords: time asymmetry, instability, irreversibility, resource, service life.

Введение

В статье [1] проанализирован оператор внутреннего времени *T* в зависимости от состояния неустойчивости системы. Естественно, что возникает необходимость аналогичного исследования оператора *T* от свойства необратимости в теории прогнозирования состояния структурно и функционально сложных систем (СФСС).

Именно, по мнению И. Р. Пригожина, «необратимость как деятельность, протекающая в пространстве-времени, приводит к изменению его структуры. На смену статистическому двуединству пространства и времени приходит более динамическое двуединство «овременованного» пространства» [2].

«…Необратимость существует не только на уровне динамических систем, но и на уровне макроскопической физики (например, в турбулентности), биологии или социологии. Следовательно, мы имеем дело с иерархией внутренних времен… Многие наши проблемы, ярко описанные Минковским [3], обусловлены конфликтом между масштабами внутреннего времени в нас самих и масштабами внутреннего времени в окружающем нас мире» [2, с. 216–217]. Это же подчеркивается в работах Уайтхеда [4] и Хайдеггера [5].

Постановка задачи

В задачах прогнозирования состояния СФСС длительного использования чрезвычайно остро стоит вопрос оценки остаточного ресурса.

В настоящее время для микроспопических систем основным критерием этой оценки является второе начало термодинамики. При этом основное внимание до недавнего времени уделялось неустойчивым процессам, в то время как задачи учета необратимости оставались несколько в стороне. А так как в сложных макроэкономических системах свойства неустойчивости и необратимости, как правило, проявляются в комплексе, то решению такой задачи должно быть уделено первостепенное внимание. Именно этой задаче и посвящается предлагаемая статья.

Основная часть

При решении поставленной задачи возможны различные по содержанию подходы. Один из них состоит в анализе «второго» внутреннего времени и его связи с необратимыми процессами. Теоретически необратимость возникает из-за использования в классической и квантовой механике идеализаций, выходящих за пределы возможности измерений, производимых с конечной точностью. Наблюдаемая необратимость является характерной особенностью теорий, надлежащим образом учитывающих природу и ограниченность наблюдения. Так утверждает И. Р. Пригожин [2, с. 187], но это утверждение вызывает серьезные сомнения. Тем более, что тут же автор сам себе противоречит: «Но, может быть, существует более тонкая форма реальности, охватывающая законы, время и вечность, с попыткой выйти за рамки наблюдаемого».

«К числу наиболее интересных новых понятий можно отнести оператор микроскопической энтропии M и оператор времени T». При этом вводится понятие «второго» внутреннего времени, совершенно отличного от времени, нумерующего в классической или квантовой механике траектории или волновые функции… Этот оператор времени удовлетворяет новому соотношению неопределенности с оператором Лиувилля *L*. Средние значения внутреннего времени ‹*T*› и ‹*T*2› можно определить с помощью билинейных форм

$$\begin{aligned} &< T >= tr\rho^T T\rho, \\ &< T^2 >= tr\rho^T T^2\rho. \end{aligned} \tag{1}$$

«Обычное» время – динамический параметр – становится средним оператора нового времени. Это следует из соотношения неопределенности

$$-i\left|L,T\right| = -i(LT - TL) = I, \tag{2}$$

где I – единичный оператор.

Из выражения (2) можно получить следующее:

$$\frac{d}{dt} < T > = \frac{d}{dt} tr\left[(e^{-iLt}\rho)^T T e^{-iLt}\rho\right] = itr\left[\rho^T e^{iLt}(LT - TL)e^{-iLt}\rho\right] = tr\rho^T\rho = \text{const}. \tag{3}$$

В частном случае выбором подходящей нормировки константу в правой части (3) можно сделать равной единице. Тогда

$$dt = d < T >. \tag{4}$$

В простом случае среднее внутреннее время T совпадает с астрономическим временем, измеряемым параметром t. Однако такое совпадение не приводит ни к каким недоразумениям: время T имеет совершенно иной характер, поскольку возникает из неустойчивости движения динамической системы… В этом случае «возраст» не зависит от вида распределения в фазовом пространстве.

Наоборот, из нового понятия следует, что возраст системы зависит от самого распределения и, таким образом, не является более внешним параметром как в традиционной формулировке.

Такой новый подход глубоко изменяет наше традиционное представление о времени, которое возникает как своего рода среднее от «индивидуальных времен ансамбля» (рис. 1) [2, с. 182–183].

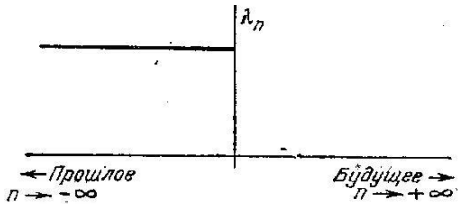


Рис. 1. Переход от прошлого ($n \to -\infty$) к будущему ($n \to +\infty$) в пределе $\tau_c \to 0$

В дополнение к изложенному выше нельзя исключить из рассмотрения и другой научный подход, в котором исследуется, что между прошлым и будущим может располагаться переходный слой «толщиной» порядка τ_c [1, 2, 6, 9]. Поэтому рассмотрим использование преобразования Λ, которое связано с введением «нелокальности» во времени. Наличие времени τ_c показывает возможность использования преобразования Λ для ввода нелокальности и в фазовое пространство. Для доказательства этого утверждения обратимся к примеру преобразования пекаря. «Пусть функция распределения ρ в начальный момент времени имеет вид

$$\rho_0 = 1 + \chi_n. \tag{5}$$

«Такая функция распределения обращалась бы в нуль в тех частях фазового пространства, где $\chi_n = -1$, и была бы отлична от нуля там, где $\chi_n = +1$.

Рассмотрим теперь «физическое» распределение $\tilde{\rho}$

$$\tilde{\rho} = \Lambda\rho_0 = 1 + \lambda_n\chi_n \approx 1 + \frac{1}{1 + e^{t/\tau_c}}\chi_n. \tag{6}$$

Так как $0 \le \lambda_n \le 1$, то функция $\tilde{\rho}$ отличается от нуля во всем фазовом пространстве. Аналогично, если бы начальное распределение было δ-функцией, сосредоточенной в окрестности некоторой точки ω_0 фазового пространства, то распределение $\Lambda\delta$ было бы делокализованным ансамблем, изображенным на рис. 1.

Нетрудно проверить, что в частном случае, изображенном на рис.1, $\Lambda\delta$ соответствовало бы сжимающему слою, проходящему через точку ω_0. Переход к вероятностному процессу вводит делокализацию и в пространстве и во времени, …т.е. появляется идея «овременивания» пространства, поскольку делокализация в пространстве будет измеряться характерным временем τ_c» [2, с. 207].

Известно, что под действием динамической группы U_t δ-функция остается локализованной во времени, а действие полугруппы W_t приводит к появлению вероятностей перехода и разрушает ло-

кализацию траектории. Также нетрудно показать, что понятие траектории теряет смысл за время порядка t/τ_c.

Представляет большой интерес рассмотреть с точки зрения нового подхода анализ внутреннего времени T, введенного в самом начале для описания микроскопического смысла необратимости. С этой целью напомним формулировку второго начала термодинамики: энтропия S монотонно возрастает до тех пор, пока не достигнет своего максимального значения в состоянии термодинамического равновесия:

$$\frac{dS}{dt} \geq 0. \tag{7}$$

Эта формулировка Клаузиуса обобщается на системы, обменивающиеся энергией и веществом с внешним миром. В нашем случае для того, чтобы перейти на макроскопический уровень, необходимо пренебречь флуктуациями внутреннего времени и, следовательно, можно рассматривать энтропию S как функцию среднего времени $\langle T \rangle$. Для изолированных систем макроскопический вариант второго начала термодинамики утверждает, что

$$\frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial < T >} \frac{\partial < T >}{\partial t} \geq 0. \tag{8}$$

Из формулы (8) видно, что производная от энтропии по t разлагается на произведение двух положительных величин: первый сомножитель показывает, что энтропия есть возрастающая функция внутреннего времени, а второй сомножитель – внутреннее время, в среднем течет в том же направлении, как и динамическое время.

Как известно [2], при традиционном подходе классической механики в микроскопической формулировке второго начала термодинамики существует различие между начальными условиями и законами эволюции. Начальные условия соответствуют заданию некоторого «состояния» (в частности, в классической механике – точки в фазовом пространстве), в то время как уравнение определяется законом. Ясно, что между состояниями и законами существует взаимосвязь, поскольку состояния возникают в результате предшествующей динамической эволюции.

В этом плане чрезвычайный интерес представляет сравнение результатов оценки ресурса объектов, полученных, например, с использованием данных об эрозионно-коррозионном износе металла стенки и по моделям с учетом асимметрии внутреннего времени [8].

Взаимосвязям состояний и законов можно придать более явный характер, если воспользоваться следующими понятиями, приведенными в [2, с. 203]:

$$\rho_0 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \varphi_n + 1 \tag{9}$$

и

$$\tilde{\rho}_0 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \lambda_n \varphi_n + 1, \tag{10}$$

где ρ (или $\tilde{\rho}$) – функции распределения по собственным функциям оператора внутреннего времени T.

В (9) будущее и прошлое входят симметрично.

Так как

$$\rho_1 = U\rho_0 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \varphi_{n+1} + 1 \tag{11}$$

и

$$\tilde{\rho}_1 = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n \lambda_{n+1} \varphi_{n+1} + 1, \tag{12}$$

то ясно, что «унитарное преобразование осуществляет перенос симметрии: числовые коэффициенты при φ_n изменяются, но фундаментальная временная симметрия сохраняется, т.е. можно сказать, что

унитарные, сохраняющие меру законы распространяют (в прошлое и в будущее) состояния, симметричные во времени.

Ситуация резко изменяется, если обратиться к соотношению (12) для образа распределения $\tilde{\rho} = \Lambda\rho$. Поскольку λ_n при $n \to +\infty$ убывают, вклады разбиений, принадлежащих будущему, «затухают».

Прошлое и будущее входят *несимметрично*: состояния обладают своего рода временной «поляризацией». Такие состояния могут возникнуть только в результате эволюции, которая сама обладает временной поляризацией и сохранит эту поляризацию в будущем.

Итак, принятие второго начала термодинамики в качестве динамического принципа приводит к далеко идущим следствиям о пространстве, времени и динамике.

Следствие 1. Внутреннее время существует только для неустойчивых динамических систем. Это было показано в работах [1, 2]. Если в соответствии с [1, 2] среднее внутреннее время $\langle T \rangle$ согласуется с динамическим временем t, например, в таких ситуациях, как преобразование пекаря, то смешивать T и t нельзя, ибо понятия внешнего и внутреннего времени совершенно различны, хотя их можно измерять по наручным часам.

Следствие 2. При анализе прогнозирования состояния сложной динамической системы является наиболее удовлетворительным рассмотрение их внутреннего описания необратимости путем отображения эволюции во времени с использованием полугруппы и перехода к вероятностным процессам, которые позволяют ввести делокализацию и в пространстве, и во времени (так называемому «овремениванию» пространства).

Следствие 3. Так как в основе общей теории относительности лежит понятие четырехмерного интервала ds^2 и координаты в пространстве-времени, используемые для описания ds^2, считаются произвольными, то в частном случае космологической модели с пространственными гиперповерхностями отрицательной кривизны можно ввести внутреннее время, тесно связанное с обычным космическим временем. Хотя в общем случае такое утверждение неверно.

Следствие 4. Поведение отдельных траекторий систем весьма чувствительно к начальным условиям. Но если воспользоваться преобразованием Λ и перейти к нелокальному описанию, то основное внимание будет сосредоточено не на поведении точек, а на поведении «малых» областей. В отличие от описания на языке траекторий нелокальное описание устойчиво. В этом случае все области фазового пространства расщепляются на области меньших размеров, которые в пределе покрывают все фазовое пространство.

Следствие 5. Состояния и законы находятся в тесной взаимосвязи. Существуют самосохраняющиеся формы начальных условий. Начальное условие приходится на момент времени, выбираемый произвольно. Он не обладает никакими специфическими свойствами, которые выделяли бы его среди прочих моментов времени. Из существования законов, ориентированных во времени, таких как возрастание энтропии по направлению к будущему, следует существование и такого рода состояний систем, ориентированных во времени. Следовательно, симметричное состояние должно возникать из другого симметричного состояния и со временем переходить в какое-то симметричное состояние. Аналогично, состояние с нарушенной симметрией должно возникать из однотипного состояния и со временем переходить в какое-то состояние того же типа [9–11].

Инвариантность характера состояний приводит к тесной взаимосвязи состояний и законов, т.е. взаимосвязи прошлого, настоящего и будущего. Настоящее связано с состояниями, будущее – с законами (уравнениями), по которым преобразуются состояния.

Таким образом, если настоящее имеет ориентацию во времени, то и будущее будет обладать нарушенной временной симметрией.

Следствие 6. Так как в природе выполняется второе начало термодинамики, которое применимо только к системам в значительной степени неустойчивым, то неустойчивость и необратимость тесно связаны между собой: необратимое, ориентированное время может появиться только потому, что *будущее не содержится в настоящем*.

В этом плане известные постулаты феномена времени А. А. Маркова, Н. М. Седякина и К. Шеннона [7, 12] применимы только для класса устойчивых систем.

В последние двенадцать лет на кафедре информатики и вычислительной техники Сургутского госуниверситета совместно с сотрудниками кафедры АСУ Обнинского ИАТЭ выполнен ряд исследований в области оценки показателей долговечности элементов и подсистем оборудования ядер-

ных энергетических установок и магистральных и нефтепромысловых трубопроводов нефти и газа. Основные результаты этих исследований изложены в монографиях и статьях, приведенных в списке литературы [8].

Заключение

Приведенная в статье краткая характеристика основных направлений и трудно решаемых задач в проблеме «прошедшее – настоящее – будущее» применительно к обоснованию остаточных ресурсов при оценке долговечности макроскопических технических систем позволяет сделать следующие выводы:

1. В первую очередь, необходимы дальнейшие исследования в следующих направлениях:

1) разработка математических методов анализа и количественной оценки асимметрии внутреннего времени в теории прогнозирования состояния макроскопических сложных динамических систем на разных уровнях описания их жизненного цикла;

2) разработка вычислительных методов для построения математических моделей анализа асимметрии времени;

3) разработка информационных технологий, реализующих данные модели;

4) разработка проекта фундаментального исследования в области развития и применения методов количественной оценки учета асимметрии внутреннего времени в прогнозировании и достижении сроков проектной и запроектной эксплуатации высоко опасных и критически важных сложных динамических систем.

2. К перспективным и труднорешаемым проблемам в настоящее время следует отнести:

– разработку математических моделей анализа и количественной оценки асимметрии времени в теории прогнозирования состояния сложных макроскопических динамических систем;

– разработку и исследование проблемы прогнозирования и количественной оценки остаточного ресурса на всех уровнях «прошлое – настоящее – будущее» сложных технических критически важных систем;

– разработку вычислительных методов расчета количественной оценки асимметрии времени сложных макроскопических динамических систем.

3. На наш взгляд, данные направления исследований в итоге должны стать основой для разработки «Программы развития фундаментальных методов учета асимметрии внутреннего времени на всех этапах жизненного цикла сложных технических комплексов».

В заключение авторы считают необходимым отметить, что трудно не согласиться с замечанием Ю. Л. Климонтовича к книге И. Р. Пригожина «От существующего к возникающему: время и сложность в физических науках»: «Значение и роль необратимых физических процессов для биологических систем были поняты значительно раньше, чем сформировалась современная статистическая и термодинамическая теория необратимых процессов. Основополагающими здесь являются работы В. И. Вернадского, и заложенные в них положения науки о биосфере уже содержали представления современной теории самоорганизации» [12–15].

Библиографический список

1. *Острейковский, В. А.* Феномен асимметрии внутреннего времени при прогнозировании состояния сложных динамических систем / В. А. Острейковский, Т. Ю. Денисова, Е. Н. Шевченко // Вестник кибернетики. – 2017. – № 4. – С. 183–190.
2. *Пригожин, И.* От существующего к возникающему: время и сложность в физических науках : пер. с англ. / И. Пригожин ; под ред. и с послесл. Ю. Л. Климонтовича. – Изд. 2-е, доп. – Москва : Едиториал УРСС, 2002. – 288 с.
3. *Minkovski, E.* Le Temp Vecu / E. Minkovski. – Neuchatel : De la Chaux et Niestle, 1968.
4. *Уайтхед, А. Н.* Избранные работы по философии / А. Н. Уайтхед. – Москва : Прогресс, 1990. – 720 с.
5. *Хайдеггер, М.* Бытие и время / М. Хайдеггер ; пер. с нем. В. В. Бибихина. – Санкт-Петербург : Наука, 2006. – 452 с.
6. *Ляпунов, А. М.* Собрание сочинений / А. М. Ляпунов. – Москва ; Ленинград, 1956. – Т. 2. – 263 с.
7. *Острейковский, В. А.* Постулаты парадокса времени в теории прогнозирования техногенного риска сложных систем / В. А. Острейковский // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий : материалы II Межрегион. науч.-практ. конф. (Севастополь, 13–17 сентября 2016 г.) / науч. ред. Б. В. Соколов. – Севастополь : СевГУ, 2016. – С. 105–106.

8. *Антонов, А. В.* Ресурс и срок службы оборудования энергоблоков атомных станций (на примере энергоблоков Смоленской АЭС) / А. В. Антонов, В. А. Острейковский. – Москва : Инновационное машиностроение, 2017. – 536 с.
9. *Артамонов, Д. В.* Методика проведения экспериментально-теоретических динамических исследований в процессе проектирования приборных устройств / Д. В. Артамонов, А. Н. Литвинов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 4 (20). – С. 28–34. – DOI 10.21 685/2307-2017-4-4.
10. *Хади, О. Ш.* Конструкторско-технологические аспекты проектирования микросборок, работающих при динамическом нагружении / О. Ш. Хади, А. Н. Литвинов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 3 (15). – С. 41–48.
11. *Голушко, Д. А.* Методика исследования динамических характеристик технических систем на основе рассогласования фаз внешнего вибрационного воздействия / Д. А. Голушко, А. В. Затылкин, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 4 (8). – С. 98–103.
12. *Денисова, Т. Ю.* Онтология феномена времени в теории прогнозирования техногенного риска сложных динамических систем: монография / Т. Ю. Денисова, В. А. Острейковский. – Сургут : Печатный мир, 2017. – 253 с.
13. *Острейковский, В. А.* Феномен асимметрии времени в теории неустойчивых и необратимых процессов сложных динамических систем : монография / В. А. Острейковский. – Сургут : Печатный мир, 2017. – 268 с.
14. *Вернадский, В. И.* Размышления натуралиста / В. И. Вернадский. – Москва : Живое слово, 1977. – Кн. 2. – 192 с.
15. *Юрков, Н. К.* Модели и алгоритмы управления интегрированными производственными комплексами : монография / Н. К. Юрков. – Пенза : Инф.-изд. центр ПГУ, 2003. – 198 с.

References

1. Ostreykovskiy V. A., Denisova T. Yu., Shevchenko E. N. *Vestnik kibernetiki* [Bulletin of Cybernetics]. 2017, no. 4, pp. 183–190. [In Russian]
2. Prigozhin I. *Ot sushchestvuyushchego k voznikayushchemu: vremya i slozhnost' v fizicheskikh naukakh: per. s angl.* [From existing to emerging: time and complexity in the physical Sciences : translation from english]. 2nd ed. suppl. Moscow: Editorial URSS, 2002, 288 p. [In Russian]
3. Minkovski E. *Le Temp Vecu* [The Temp Lived]. Neuchatel: De la Chaux et Niestle, 1968.
4. Uaytkhed A. N. *Izbrannye raboty po filosofii* [Selected works on philosophy]. Moscow: Progress, 1990, 720 p. [In Russian]
5. Khaydegger M. *Bytie i vremya* [Being and time]. Transl. from German by V. V. Bibikhin. Saint-Petersburg: Nauka, 2006, 452 p. [In Russian]
6. Lyapunov A. M. *Sobranie sochineniy* [Collected works]. Moscow; Leningrad, 1956, vol. 2, 263 p. [In Russian]
7. Ostreykovskiy V. A. *Perspektivnye napravleniya razvitiya otechestvennykh informatsionnykh tekhnologiy: materialy II Mezhregion. nauch.-prakt. konf. (Sevastopol', 13–17 sentyabrya 2016 g.)* [Promising directions of development of domestic information technologies : materials II inter-region. science.-prakt. conf. (Sevastopol, 13–17 September 2016)]. Sevastopol: SevGU, 2016, pp. 105–106. [In Russian]
8. Antonov A. V., Ostreykovskiy V. A. *Resurs i srok sluzhby oborudovaniya energoblokov atomnykh stantsiy (na primere energoblokov Smolenskoy AES)* [Resource and service life of nuclear power plant units equipment (on the example of Smolensk NPP units)]. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2017, 536 p. [In Russian]
9. Artamonov D. V., Litvinov A. N., Yurkov N. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2017, no. 4 (20), pp. 28–34. DOI 10.21 685/2307-2017-4-4. [In Russian]
10. Khadi O. Sh., Litvinov A. N., Yurkov N. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2016, no. 3 (15), pp. 41–48. [In Russian]
11. Golushko D. A., Zatylkin A. V., Yurkov N. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2014, no. 4 (8), pp. 98–103. [In Russian]
12. Denisova T. Yu., Ostreykovskiy V. A. *Ontologiya fenomena vremeni v teorii prognozirovaniya tekhnogennogo riska slozhnykh dinamicheskikh sistem: monografiya* [Ontology of the time phenomenon in the theory of prediction of technogenic risk of complex dynamic systems: monograph]. Surgut: Pechatnyy mir, 2017, 253 p. [In Russian]
13. Ostreykovskiy V. A. *Fenomen asimmetrii vremeni v teorii neustoychivykh i neobratimykh protsessov slozhnykh dinamicheskikh sistem: monografiya* [The phenomenon of time asymmetry in the theory of unstable and irreversible processes of complex dynamical systems : monograph]. Surgut: Pechatnyy mir, 2017, 268 p. [In Russian]
14. Vernadskiy V. I. *Razmyshleniya naturalista* [Reflections of a naturalist]. Moscow: Zhivoe slovo, 1977, bk. 2, 192 p. [In Russian]
15. Yurkov N. K. *Modeli i algoritmy upravleniya integrirovannymi proizvodstvennymi kompleksami: monografiya* [Models and algorithms for the management of integrated industrial complexes : monograph]. Penza: Inf.-izd. tsentr PGU, 2003, 198 p. [In Russian]

Острейковский Владислав Алексеевич
доктор технических наук, профессор,
кафедра информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(628412, Россия, г. Сургут, ул. Ленина, 1)
E-mail: ova@ivi.surgu.ru

Лысенкова Светлана Александровна
кандидат физико-математических наук, доцент,
кафедра информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(628412, Россия, г. Сургут, ул. Ленина, 1)
E-mail: lsa1108@mail.ru

Шевченко Елена Николаевна
кандидат физико-математических наук, доцент,
кафедра информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(628412, Россия, г. Сургут, ул. Ленина, 1)
E-mail: elenan_27@mail.ru

Ostreykovsky Vladislav Alekseevich
doctor of technical sciences, professor,
sub-department of informatics and computer science,
Surgut State University
(628412, 1 Lenin street, Surgut, Russia)

Lysenkova Svetlana Aleksandrovna
candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor,
sub-department of informatics and computer science,
Surgut State University
(628412, 1 Lenin street, Surgut, Russia)

Shevchenko Elena Nikolaevna
candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor,
sub-department of informatics and computer science,
Surgut State University
(628412, 1 Lenin street, Surgut, Russia)

УДК 517.98:519.2:621.039
Острейковский, В. А.
Феномен асимметрии внутреннего времени с учетом неустойчивости и необратимости процессов в теории прогнозирования состояния сложных динамических систем / В. А. Острейковский, С. А. Лысенкова, Е. Н. Шевченко // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 1 (25). – С. 3–10. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-1.

УДК 004 67 DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-2

О. Б. Бутусов, В. В. Дикусар

НОВЫЙ МЕТОД АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ И ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

O. B. Butusov, V. V. Dikusar

A NEW METHOD FOR ANALYZING IMAGES AND TIME SERIES USING A POTENTIAL TRANSFORMATION

Аннотация. Предложен новый метод преобразования временных рядов и изображений, аналогичный методу анализа изображений с помощью дистанционных преобразований. Метод отличается тем, что для трансформации используются не расстояния между бинарными точками, а их нелинейные комбинации по формулам, которые аналогичны по структуре формулам расчета различных видов потенциальной энергии. Суть метода состоит в следующем. На первом шаге используется бинаризация исходного черно-белого изображения или временного ряда. Далее двоичные пиксели (точки бинарного изображения) рассматриваются как взаимодействующие псевдочастицы. Преобразование выполняется с помощью скользящего окна. Для каждого положения скользящего окна вычисляется псевдопотенциал, который записывается в центральную точку окна. Рассмотрены два вида псевдопотенциалов: потенциал спин-спинового взаимодействия Изинга и кулоновский потенциал. Для временных рядов расчеты проводились при разных значениях ширины скользящего окна. Соединение полученных результатов было представлено в виде двухмерного изображения. Результаты данного 1D в 2D преобразования показали, что потенциальная трансформация дает более подробную информацию о скрытых паттернах по сравнению с непрерывным вейвлет-преобразованием.

Ключевые слова: временные ряды, изображения, непрерывное вейвлет-преобразование, потенциал Изинга, кулоновский потенциал, бинаризация, нормализация, очистка временных рядов от выбросов.

Abstract. A new method of time series and image transformation similar to the method of image analysis using remote transformations is proposed. The method is characterized by the fact that the transformation is not used distances between binary points, and their nonlinear combinations of formulas, which are similar in structure to the calculation formulas of different types of potential energy. The essence of the method is as follows. The first step uses binarization of the original black-and-white image or time series. Further binary pixels (binary image points) are considered as interacting pseudo-particles. The conversion is performed using a sliding window. For each position of the sliding window, a pseudopotential is calculated, which is written to the center point of the window. Two types of pseudopotentials are considered: the potential of the spin-spin Ising interaction and the Coulomb potential. For time series, calculations were performed at different values of the sliding window width. The combination of the results was presented as a two-dimensional image. The results of this 1-D to 2-D transformation showed that the potential transformation gives more detailed information about the hidden patterns compared to the continuous wavelet transform.

Keywords: time series, images, continuous wavelet transform, Ising potential, Coulomb potential, binarization, normalization, time series purification from emissions.

Введение

Одномерные числовые временные ряды (ВР) – это дискретные эквидистантные последовательности чисел. Двумерные черно-белые изображения – это двумерные паттерны чисел. Как правило, это однобайтовые целые числа. С классической точки зрения ВР обычно рассматривается как сложение некоторого регулярного сигнала и шумовой составляющей [1]. При таком подходе основная проблема заключается в выделении регулярного сигнала, т.е. в разделении регулярного полезного сигнала и шума. Для решения данной задачи используют алгоритмы сглаживания [2] и фильтры.

© Бутусов О. Б., Дикусар В. В., 2019

Также хорошие результаты могут быть получены с помощью дискретного вейвлет-преобразования (ДВР) [3–5]. ДВР разделяет ВР на несколько составляющих: аппроксимацию и детализации [3–5]. Данный подход является достаточно эффективным при условии, что шум содержит полезную информацию. Также эффективным средством анализа ВР является непрерывное вейвлет-преобразование (НВП), которое позволяет перейти от одномерного представления информации к двумерному и, таким образом, значительно расширяет горизонты ВР-анализа.

При анализе изображений важную роль имеет выделение паттернов, которые представляют собой мозаику байтовых чисел на изображении. После бинаризации изображение представляет собой множество бинарных точек (БТ). При этом паттерны образуют пространственную мозаику, для описания которой могут быть использованы расстояния между БТ. Различные методы вычисления расстояний приводят к различным вариантам дистанционного преобразования (ДП) бинарных изображений (БИ). В задачах анализа изображений ДП широко используется как эффективный инструмент изучения паттернов [6]. Существует множество различных методов и мер расстояния, которые используются в расчетах ДП. Евклидово расстояние (ЕР) является одной из наиболее часто используемых мер расстояния [7]. Недостатком алгоритмов расчета ЕР является то, что эти алгоритмы требуют вычисления квадратного корня и поэтому являются достаточно медленными. Данная проблема изучалась в задачах описания разреженных объектов в дискретной геометрии [8] с использованием ДП. Также алгоритм ДП был успешно использован в [9] для автоматического распознавания образов.

Сложность алгоритма ДП была проанализирована в работе [10], в которой были рассмотрены несколько эффективных алгоритмов: алгоритм преобразования Лежандра с линейным временем (ЛЛВ), алгоритм параболической огибающей (ПО) и алгоритм быстрого локального преобразования (БЛП). В работе [10] показано, что эти алгоритмы имеют линейную сложность и могут эффективно использоваться в расчетах ДП. В настоящее время для вычисления ДП широко используются высокоскоростные параллельные вычисления и графические процессоры [11]. Следует отметить, что ДП оказывается весьма полезным во многих практических приложениях. Например, в медицинской диагностике ДП является одним из лучших средств для обнаружения сходства между паттернами с помощью последовательной серии изображений [12]. Решение данной задачи имеет важное значение для анализа внутренних органов. Хорошие результаты по сегментации клеток крови на изображениях были получены при совместном использовании градиентных алгоритмов и ДП [13]. В градиентных алгоритмах используются черно-белые изображения. С этой целью в работе [13] ДП было использовано для преобразования бинарного изображения в черно-белое. В расчетах использовались четыре различные меры расстояния: ЕР, расстояние городских кварталов (РГК), расстояние шахматной доски (РШД) и квазиевклидово расстояние (КЕР). Было показано, что при решении задач сегментации изображений РШД приводит к наилучшим результатам.

В данной работе мы использовали ДП для расчета так называемых псевдопотенциалов. Суть метода состоит в следующем. Предположим, что предварительно нормализованный ВР был бинаризован, например, на уровне 0,5. Назовем точки, для которых $f(x_i) > 0{,}5$ как «белые» точки, в противном случае – как «черные» точки. Иногда «белые» точки называют точками, принадлежащими объектам, а «черные» точки называют фоновыми. На бинарном изображении «белые» точки могут рассматриваться как псевдочастицы. Эти частицы создают поле псевдопотенциала, значение которого может быть вычислено и помещено в центральный пиксель скользящего окна (СО). За один проход СО по временному ряду мы получаем одну потенциальную кривую, соответствующую выбранной ширине СО. Соединив эти кривые при различных значениях ширины СО, получаем 2D изображение. Таким образом, данная операция осуществляет 1D в 2D преобразование ВР. Это преобразование подобно НВП, но имеет отличную от НВП природу. НВП зависит только от одного параметра, в то время как потенциальное преобразование (ПП) зависит от конфигурации всех точек ВР или БИ. В данной работе рассмотрены два вида псевдопотенциалов: потенциал спин-спинового взаимодействия Изинга [14] и кулоновский потенциал. Другие виды потенциалов также могут быть использованы для ПП, например, потенциалы: Леннарда – Джонса [15, 16], Терзофа [17] или Морзе [15, 16].

Потенциальные преобразования ВР и БИ

Потенциальное преобразование ВР и БИ включает следующие шаги.

1. Предварительные преобразования.

1.1. Первым шагом предварительной обработки ВР является удаление тренда. Функцию тренда можно получить как с помощью локального, так и глобального сглаживания или аппроксимации.

В данной работе использована локальная сплайн-регрессия. Далее по формуле $v_i = a_i - f(a_i)$ рассчитывается ВР с удаленным трендом, где a_i – исходный ВР, $f(a_i)$ – тренд.

1.2. Второй шаг – удаление выбросов. Важно удалить из ВР выбросы, так как они в большинстве случаев являются аномалиями и не связаны с паттернами. Чтобы удалить выбросы, использован следующий алгоритм: а) расчет глобального среднего и глобального стандартного отклонения; б) удаление из ВР точек с величиной большей, чем два стандартных отклонения: $k = \arg(|v_i| > 2\sigma)$, $v_k = [\,]$, где оператор [ ] – означает «удалить», σ – стандартное отклонение; в) новый расчет глобального среднего и стандартного отклонения; г) нормализация полученного ВР по формуле $u_k = \dfrac{v_k + 3\sigma_1}{6\sigma_1}$, где σ_1 – новое стандартное отклонение (нормализация преобразует ВР-интервал $[-3\sigma, 3\sigma] \to [0,1]$); д) дополнительная нормализация по следующей формуле: $x_k = \dfrac{u_k - u_{\min}}{u_{\max} - u_{\min}}$.

2. Бинаризация.

Бинаризация – это преобразование ВР в бинарные точки

$$b_k = \begin{cases} 1, & x_k > L, \\ 0, & \text{otherwise}, \end{cases} \tag{1}$$

где L – уровень бинаризации.

Назовем точки, для которых $b_k = 1$ являются «белыми» точками, а в противоположном случае – «черными» точками.

3. Потенциальное преобразование.

Потенциальное преобразование выполняется с использованием так называемого скользящего окна. СО перемещается по точкам ВР от одной точки к другой. Потенциалы рассчитываются только для «белых» бинарных точек, расположенных внутри СО. В данной работе использованы два вида потенциала: потенциал, зависящий от расстояния между БТ (кулоновский потенциал) и независящий от расстояния потенциал спин-спинового взаимодействия Изинга [14].

3.1. Потенциал спин-спинового взаимодействия Изинга (ПИ).

В модели Изинга спин-спиновое взаимодействие рассматривается только между ближайшими спинами [14]. Предположим, что «белые» точки имеют спин $S_i = 1$, а «черные» точки имеют спин $S_i = -1$. Общий потенциал Изинга равен суммированию всех двухчастичных взаимодействий:

$$U_{I\sin g}(c) = \begin{cases} J \sum\limits_{(t,q \in MW)} S_t S_q = J \sum\limits_{(t,q \in MW)} b_t b_q, & r_{tq} \le R, \\ 0, & \text{otherwise}, \end{cases} \tag{2}$$

где MW – область скользящего окна; c – центральная точка скользящего окна; t, q – координаты «белых» точек внутри движущегося окна; r_{tq} – расстояние между точками t и q; R – предельное расстояние для взаимодействия Изинга; J – параметр модели (в расчетах принято: $J = 1$).

Для каждого положения СО общий потенциал спин-спинового взаимодействия между частицами присваивается центральной точке СО. Данное преобразование ВР было названо преобразованием Изинга (ПИ).

В случае когда предельное расстояние для взаимодействия Изинга равно размеру СО, ПИ может быть рассчитан по следующей упрощенной формуле $U_{I\sin g}(c) = \dfrac{1}{2} n_{tq}(n_{tq} - 1)$, где n_{tq} – количество «белых» точек внутри СО.

3.2. Кулоновский потенциал.

Алгоритм вычисляет суммарный кулоновский потенциал взаимодействия между «белыми» БТ, $U(p) = \sum\limits_{i<j} V(r_{ij}) = \sum\limits_{i<j} \dfrac{1}{r_{ij}}$, где r_{ij} – расстояние между двумя БТ. Суммарное взаимодействие между «белыми» БТ вычисляется следующим образом:

$$U(c)=\sum_{i,j\in G}\frac{1}{|i-j|}, \tag{3}$$

где $G=\{i\neq j\neq c;\ i,j,c\in MW\}$, MW – область скользящего окна, c – центральная точка СО.

Для потенциального преобразования могут использоваться и другие виды потенциалов, например, потенциал Леннарда – Джонса [15,16]:

$$u(r_{ij})=\begin{cases}4\varepsilon\left(\left(\frac{\sigma}{r_{ij}}\right)^{12}-\left(\frac{\sigma}{r_{ij}}\right)^{6}\right), & r_{ij}<r_c,\\ 0, \quad \text{otherwise}, \end{cases} \tag{4}$$

где r_{ij} – расстояние между БТ, ε, σ – параметры потенциала, r_c – предельное расстояние для потенциала Леннарда – Джонса. Параметр ε определяет силу взаимодействия, а σ – масштаб длины. На коротком расстоянии между БТ взаимодействие отталкивает частицы. При увеличении расстояния БТ начинают притягиваться друг к другу. На некотором предельном расстоянии r_c взаимодействие прекращается.

Полагая $\varepsilon=1,\quad \sigma=r_c=w$ и обозначив d как половину ширины СО, получаем следующее расчетное уравнение для потенциала Леннарда – Джонса:

$$U(c)=4\sum_{r_{ij}<w}\left(\left(\frac{w}{|i-j|}\right)^{12}-\left(\frac{w}{|i-j|}\right)^{6}\right), \tag{5}$$

где w – ширина СО.

Используя различные псевдопотенциалы взаимодействия БТ, например, потенциал Морза или потенциал Терзофа [15–17], можно получить другие паттерны.

Для каждого размера СО вектор, полученный в результате движения СО по ВР, получил название потенциальная кривая или потенциальный вектор (ПВ). С помощью ПВ были рассчитаны следующие нормированные статистические показатели, характеризующие пространственную структуру ВР [18–19].

Нормализованное среднее арифметическое

$$\overline{p}=\frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}p_i}{\max_i\left(|p_i|\right)}, \tag{6}$$

где p – потенциальный вектор, n – количество точек ВР.

Нормализованное стандартное отклонение

$$\sigma=\frac{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(p_i-\overline{p})^2}{\max_i\left((p_i-\overline{p})^2\right)}. \tag{7}$$

Нормализованный коэффициент асимметрии

$$Sk=\frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(p_i-\overline{p})^3}{\max_i\left(|p_i-\overline{p}|\right)^3}. \tag{8}$$

Нормализованный коэффициент эксцесса

$$Ku=\frac{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(p_i-\overline{p})^4}{\max_i\left((p_i-\overline{p})^4\right)}. \tag{9}$$

Полученные результаты

В качестве примера расчета ПП рассмотрим ВР ежедневных котировок (USD) стоимости платины на Лондонской бирже металлов «London Metal Exchange» (LME). Ежедневные котировки получены с веб-сайта https://www.quandl.com/data/LME для периода с 2 апреля 1990 г. по 27 апреля 2018 г. На рис. 1 представлен исходный ВР и его сплайн-аппроксимация. На рис. 1 вблизи 4500 дня наблюдается несколько выбросов.

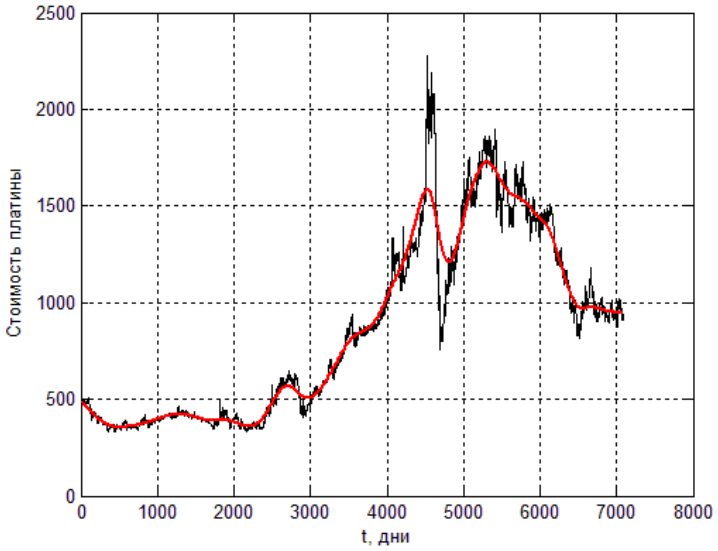


Рис. 1. Исходный ВР ежедневных котировок (USD) стоимости платины на Лондонской бирже металлов со 2 апреля 1990 г. по 27 апреля 2018 г. – черная линия и сплайн-аппроксимация ВР – красная

На рис. 2 представлен исходный ВР, из которого удален тренд. На рис. 2 также наблюдаются выбросы. Нормализация и очистка ВР от выбросов выполнена с помощью методики, описанной в разделе 1.2. Полученный в результате временной ряд и его гистограмма представлены на рис. 3.

Рассмотрим результаты потенциального преобразования, выполненные над нормализованным и очищенным вариантом ВР. ПП рассчитывалось с помощью скользящих окон, полуширина которых, выраженная в количестве точек ВР, изменялась с шагом пять в интервале от 5 до 200. На каждом шаге цикла по полуширине СО вычислялась кривая ПП. Например, одна из кривых ПП для потенциала Изинга и одна из кривых для кулоновского потенциала показаны на рис. 4.

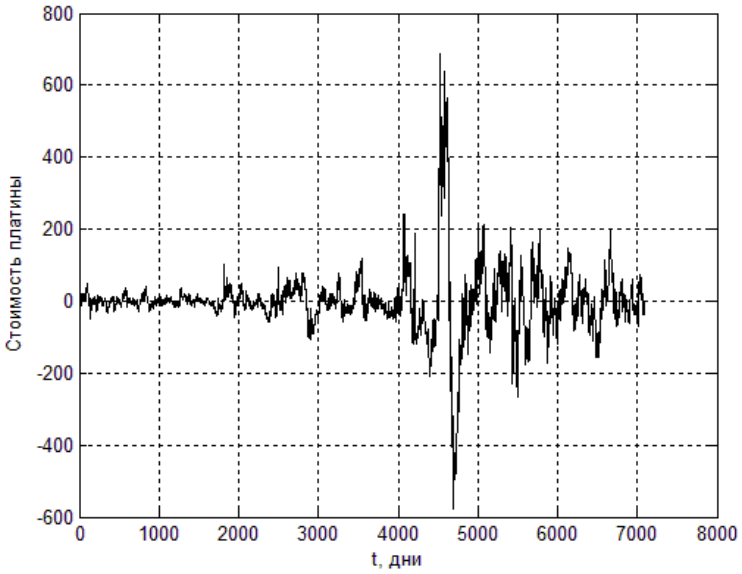
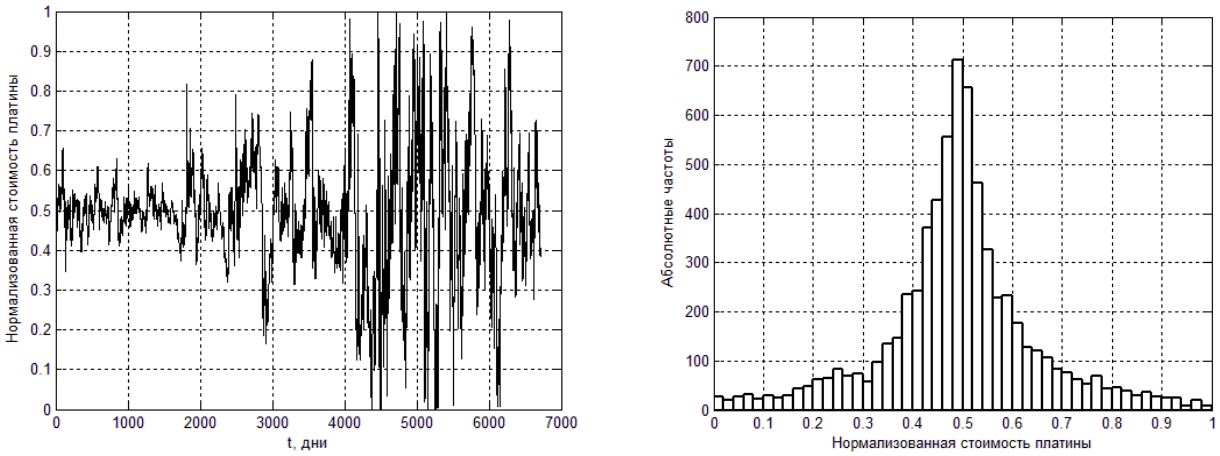
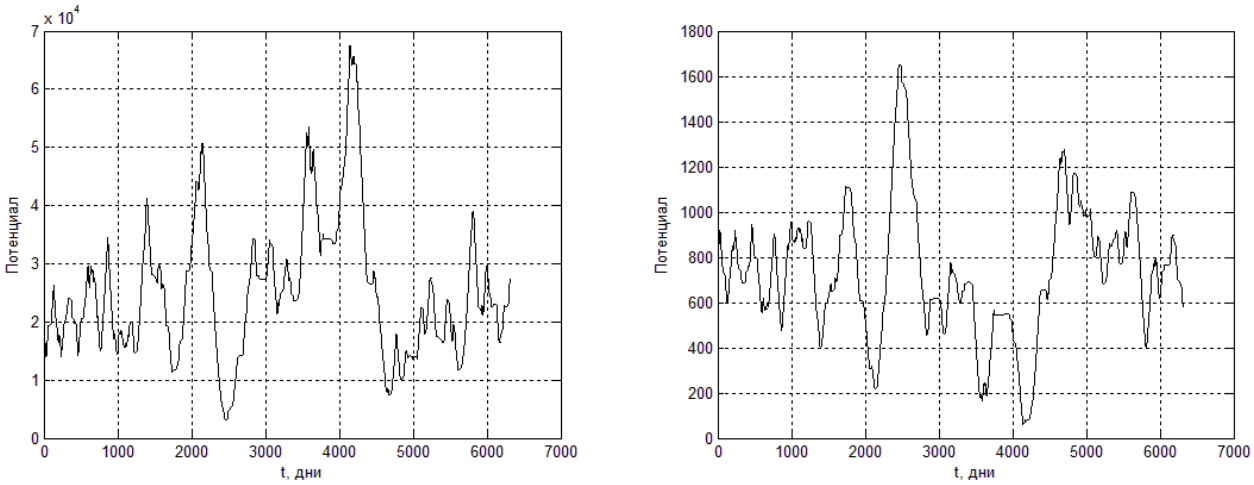


Рис. 2. Исходный ВР с удаленным трендом



а) *б*)

Рис. 3. Нормализованный и очищенный от выбросов ВР:
а – ВР; *б* – гистограмма ВР



а) *б*)

Рис. 4. Кривые ПП для размера СО $d = 200$:
а – потенциал Изинга; *б* – кулоновский потенциал

Как следует из рис. 4, кривые для рассмотренных потенциалов имеют похожие элементы структуры. При этом величина потенциалов существенно различается, так как для расчета потенциалов использовались различные формулы. Наличие общих структурных элементов указывает на возможность использования этих элементов для описания структурных особенностей ВР.

В результате соединения потенциальных кривых как отдельных строк получаются двумерные изображения, которые аналогичны двухмерным разверткам непрерывного вейвлет-преобразования. В НВП в качестве параметра развертки используется размер вейвлета, в ПП – полуширина СО. На рис. 5 представлена 1D → 2D развертка рассмотренного ВР, полученная с помощью ПП Изинга. Для сравнения на рис. 6 представлена 2D развертка, полученная с помощью НВП (вейвлет Добеши).

Из сравнения рис. 5 и 6 следует, что структурные особенности ВР проявлены на рис. 5 более отчетливо. Наиболее характерные особенности приходятся на следующие дни: 1500, 2100, 3600 и 4100. Для НВП наиболее характерные особенности приходятся на дни: 4100, 4500, 4800 и 5200. Результаты НВП хорошо подтверждаются поведением ВР в районе указанных дней. На рис. 3,*а* хорошо видно, что ВР в районе этих дней изобилует скачками большой амплитуды. Однако и вблизи особенностей, обнаруженных на развертке ПП также наблюдаются скачки, но меньшей амплитуды. Данный результат указывает на то, что потенциальное преобразование можно рассматривать как эффективный дополнительный к НВП инструмент для анализа ВР. Таким образом,

рассмотренный метод ПП может быть предложен для дополнительного поиска особенностей ВР, не обнаруженных с помощью НВП.

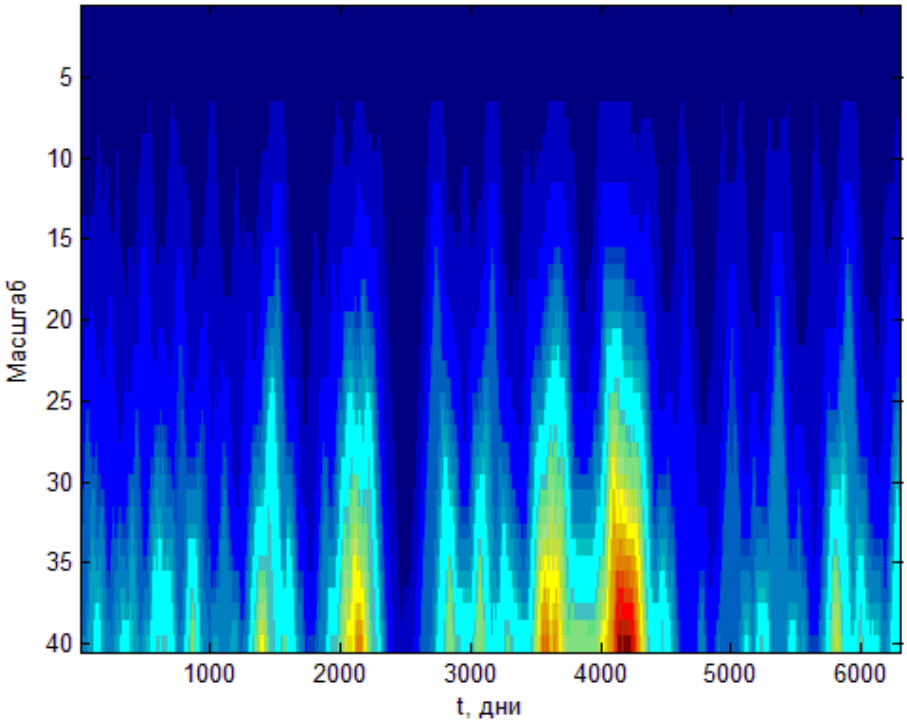


Рис. 5. Потенциальное преобразование ВР с помощью ПП Изинга

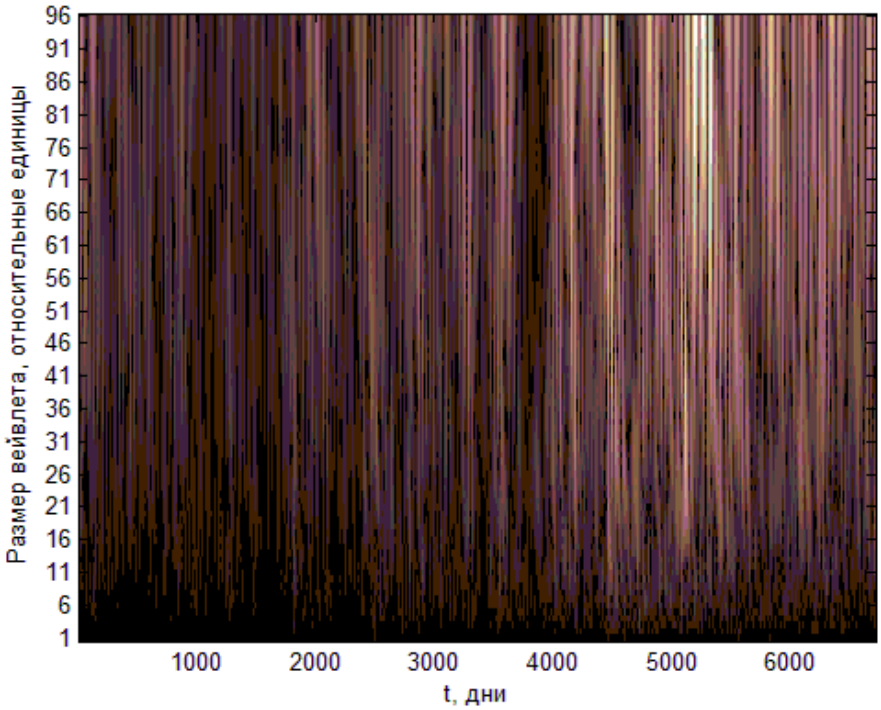


Рис. 6. Непрерывное вейвлет-преобразование ВР (вейвлет Добеши)

Заключение

Предложен новый метод анализа временных рядов. Метод использует различные виды потенциального преобразования. Суть потенциального преобразования состоит в выполнении следующих шагов. Шаг 1 – бинаризация временных рядов. В результате точки делятся на два класса. Точки

каждого класса рассматривались как взаимодействующие псевдочастицы. Шаг 2 – вычисляются псевдопотенциалы псевдовзаимодействий между точками одного или различных классов. В данной работе псевдопотенциалы были рассчитаны по формулам взаимодействий двух видов: спин-спинового взаимодействия Изинга и кулоновского взаимодействия. Потенциальное преобразование вычислялось с помощью скользящего окна. Для каждого положения скользящего окна вычисленное значение потенциала записывалось в центральную точку окна. В результате вычислялась кривая ПП. Полученные при разных значениях полуширины окна кривые соединялись вместе, в результате чего создавалось изображение. Это изображение представляет собой один из вариантов 2D развертки, аналогичной 2D развертке, создаваемой с помощью НВП.

Результаты проведенного исследования показывают:

1. Потенциальное преобразование является 2D преобразованием, которое наглядно представляет структурные особенности ВР в виде двухмерных изображений.

2. ПП и НВП хорошо дополняют друг друга и проявляют как общие особые точки ВР, так и индивидуальные.

3. ПП можно рекомендовать в качестве дополнительного инструмента анализа ВР.

Библиографический список

1. *Shumway, R. H.* Time Series Analysis and Its Applications with R Examples / R. H. Shumway, D. S. Stoffer. – New York : Springer Science Business Media, LLC, 2006. – 202 p.
2. *Pollock, D. S. G.* A Handbook of Time-Series Analysis, Signal Processing and Dynamics / D. S. G. Pollock. – New York : Academic press, 1999. – 808 p.
3. *Addison, P. S.* The Illustrated Wavelet Transform Handbook. Introductory theory and applications in science, engineering, medicine and finance / P. S. Addison. – London : Institute of physics publishing, 2002. – 368 p.
4. *Daubechies, I.* Ten lectures on wavelets, CBMS-NSF conference series in applied mathematics / I. Daubechies. – London : SIAM Ed, 1992. – 380 p.
5. *Mallat, S.* A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. IEEE / S. Mallat // Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1989. – Vol. 11, № 7. – P. 674–693.
6. *Borgefors, G*. Distance transform in digital image / G. Borgefors // Computer Vision, Graphics and Image Processing. – 1986. – Vol. 34. – P. 344–371.
7. *Danielsson, P.* E. Euclidean distance mapping / P. E. Danielsson // Computer Graphics and Image Processing. – 1980. – Vol. 14. – P. 227–248.
8. *Strand, R.* Sparse object representations by digital distance functions / R. Strand // Discrete Geometry for Computer Imagery, 6607 in Lecture Notes in Computer Science. – Berlin ; Heidelberg : Springer, 2011. – P. 211–222.
9. *Ghafoor, A.* Image matching using distance transform / A. Ghafoor, R. N. Iqbal, S. Khan // Image Analysis : proceedings of 13th Scandinavian Conference, SCIA Halmstad (Sweden, June 29 – July 2, 2003). – Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 2003. – P. 654–660.
10. *Lucet, Y.* New sequential exact Euclidean distance transform algorithms based on convex analysis / Y. Lucet // Image and Vision Computing. – 2009. – Vol. 27. – P. 37–44.
11. *Cuntz, N.* Fast hierarchical 3D distance transforms on the GPU / N. Cuntz, A. Kolb // Eurographics. – 2007. – P. 93–96.
12. *Selvi, E.* Performance analysis of distance transform based inter-slice similarity information on segmentation of medical image series / E. Selvi, M. Özdemir, M. Alper Selver // Mathematical and Computational Applications. – 2013. – Vol. 18, № 3. – P. 511–520.
13. *Nooka Raju, C. H.* Studies on watershed segmentation for blood cell images using different distance transforms / C. H. Nooka Raju, G. S. N. Raju, V. K. Varma Gottumukkala // IOSR Journal of VLSI and Signal Processing (IOSR-JVSP). – 2016. – Vol. 6, № 2. – P. 79–85.
14. *Binder, K.* Monte Carlo Simulation in Statistical Physics / K. Binder, D. Heermann. – 5th ed. – Berlin : Springer, 2010. – 180 p.
15. Molecular Dynamics – Theoretical Developments and Applications in Nanotechnology and Energy / ed. by Lichang Wang. – Croatia : InTech, 2012. – 436 p. – URL: www.intechopen.com
16. *Rapaport, D. C.* The art of molecular dynamics simulation / D. C. Rapaport. – Cambridge ; New York : Cambridge University Press, 2004. – 564 p.
17. *Tersoff, J.* Modeling solid-state chemistry: Interatomic potentials for multicomponent systems / J. Tersoff // Physical Review B. – 1989. – Vol. 39. – P. 5566–5568.
18. Models of Printed Circuit Boards Conductive Pattern Defects / E. Danilova, I. Kochegarov, N. Yurkov, M. Miheev, N. Kante // Applied computer systems. – Vol. 23, № 2. – P. 128–134. – DOI 10.2478/acss-2018-0016.
19. Discrete Models in Research of Wave Processes in Rod Structures of Radio-Electronic Means / A. Lysenko, N. Yurkov, V. Trusov, T. Zhashkova, J. Lavendels // Applied computer systems. – Vol. 23, № 2. – P. 135–140. – DOI 10.2478/acss-2018-0017.

References

1. Shumway R. H., Stoffer D. S. *Time Series Analysis and Its Applications with R Examples*. New York: Springer Science Business Media, LLC, 2006, 202 p.
2. Pollock D. S. G. *A Handbook of Time-Series Analysis, Signal Processing and Dynamics*. New York: Academic press, 1999, 808 p.
3. Addison P. S. *The Illustrated Wavelet Transform Handbook. Introductory theory and applications in science, engineering, medicine and finance*. London: Institute of physics publishing, 2002, 368 p.
4. Daubechies I. *Ten lectures on wavelets, CBMS-NSF conference series in applied mathematics*. London: SIAM Ed, 1992, 380 p.
5. Mallat S. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1989, vol. 11, no. 7, pp. 674–693.
6. Borgefors G. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*. 1986, vol. 34, pp. 344–371.
7. Danielsson P. E. *Computer Graphics and Image Processing*. 1980, vol. 14, pp. 227–248.
8. Strand R. *Discrete Geometry for Computer Imagery, 6607 in Lecture Notes in Computer Science*. Berlin; Heidelberg: Springer, 2011, pp. 211–222.
9. Ghafoor A., Iqbal R. N., Khan S. *Image Analysis: proceedings of 13th Scandinavian Conference, SCIA Halmstad (Sweden, June 29 – July 2, 2003)*. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2003, pp. 654–660.
10. Lucet Y. *Image and Vision Computing*. 2009, vol. 27, pp. 37–44.
11. Cuntz N., Kolb A. *Eurographics*. 2007, pp. 93–96.
12. Selvi E., Özdemir M., Alper Selver M. *Mathematical and Computational Applications*. 2013, vol. 18, no. 3, pp. 511–520.
13. Nooka Raju C. H., Varma Gottumukkala V. K. *IOSR Journal of VLSI and Signal Processing (IOSR-JVSP)*. 2016, vol. 6, no. 2, pp. 79–85.
14. Binder K., Heermann D. *Monte Carlo Simulation in Statistical Physics*. 5th ed. Berlin: Springer, 2010, 180 p.
15. *Molecular Dynamics – Theoretical Developments and Applications in Nanotechnology and Energy*. Ed. by Lichang Wang. Croatia: InTech, 2012, 436 p. Available at: www.intechopen.com
16. Rapaport D. C. *The art of molecular dynamics simulation*. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2004, 564 p.
17. Tersoff J. *Physical Review B*. 1989, vol. 39, pp. 5566–5568.
18. Danilova E., Kochegarov I., Yurkov N., Miheev M., Kante N. *Applied computer systems*. Vol. 23, no. 2, pp. 128–134, DOI 10.2478/acss-2018-0016.
19. Lysenko A., Yurkov N., Trusov V., Zhashkova T., Lavendels J. *Applied computer systems*. Vol. 23, no. 2, pp. 135–140. DOI 10.2478/acss-2018-0017.

Бутусов Олег Борисович
доктор физико-математических наук, профессор,
кафедра математики,
Московский политехнический университет
(107023, Россия, г. Москва, ул. Б. Семеновская, 38)
E-mail: butusov-1@mail.ru

Дикусар Василий Васильевич
доктор физико-математических наук, профессор,
главный научный сотрудник отдела безопасности
и нелинейного анализа,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и Управление»
Российской академии наук
(Вычислительный центр
им. А. А. Дородницына РАН)
(119333, Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 40);
профессор, кафедра высшей математики,
Московский физико-технический институт
(государственный университет)
(141701, Россия, Московская область,
г. Долгопрудный, Институтский пер., 9)
E-mail: dikussar@yandex.ru

Butusov Oleg Borisovich
doctor of physical and mathematical sciences, professor,
sub-department of mathematics,
Moscow Polytechnic University
(107023, 38 B. Semenovskaya street, Moscow, Russia)

Dikusar Vasily Vasilevich
doctor of physical and mathematical sciences, professor,
chief researcher of the Department of security
and non-linear analysis,
Federal Research Center for computer science
and management of the Russian Academy of Sciences
(Computing Center, A. A. Dorodnicyna RAS)
(119333, 40 Vavilov street, Moscow, Russia);
professor, sub-department of higher mathematics,
Moscow Institute of Physics and Technology
(State University)
(141701, 9 Institutsky lane, Dolgoprudny,
Moscow region, Russia)

УДК 004 67
Бутусов, О. Б.
Новый метод анализа изображений и временных рядов с использованием потенциального преобразования / О. Б. Бутусов, В. В. Дикусар // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 1 (25). – С. 11–20. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-2.

УДК 519.2:621.039:1 + 517.98 DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-3

В. А. Острейковский, С. А. Лысенкова, Е. Н. Шевченко

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭФФЕКТА АСИММЕТРИИ ВРЕМЕНИ В ЗАДАЧАХ ОЦЕНКИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СЛОЖНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ[1]

V. A. Ostreykovsky, S. A. Lysenkova, E. N. Shevchenko

ON THE POSSIBILITY OF USING THE EFFECT OF TIME ASYMMETRY IN PROBLEMS OF ESTIMATING THE DURABILITY OF COMPLEX TECHNICAL SYSTEMS

Аннотация. *Актуальность и цели.* Существующие методы оценки показателей долговечности сложных технических систем (ресурса, остаточного ресурса, срока службы) основаны на детерминированных и вероятностно-статистических идеях. Для структурно и функционально сложных систем, у которых искомый ресурс и срок службы составляет 30–50 и более лет, часто изготавливаемых малыми сериями, а иногда и уникальных, применение традиционных методов расчета показателей долговечности весьма проблематично. Поэтому использование современного математического аппарата функционального анализа может повысить точность прогноза состояния сложных макроскопических технических систем. *Материалы и методы*. Применялись методы оценки долговечности сложных динамических систем. Перспективным направлением в исследовании прогнозирования показателей долговечности высоко ответственных и особенно критически важных систем является применение теории операторов функционального анализа. С этой целью рассмотрены два класса операторов: операторы микроскопической и макроскопической энтропии и оператор внутреннего времени жизненного цикла систем «в модусах «прошлое-настоящее-будущее». *Результаты*. Подробно проанализированы взгляды и концепции философской и научной мысли о природе времени, а также постулаты модусов «прошлое – настоящее – будущее». Показаны детерминированные и вероятностно-статистические методы оценки показателей долговечности, требующие большого объема как экспериментальных данных, так и данных реальной эксплуатации объектов, что часто трудно выполнить. Введение нового понятия в теорию долговечности сложных технических систем «внутреннее» время играет важную роль в переходе от динамического, обратимого описания функционирования, характерного

Abstract. *Background*. Existing methods for assessing the durability of complex technical systems are based on deterministic and probabilistic-statistical ideas. For structurally and functionally complex systems, in which service life is 30–50 years or more, often manufactured in small batches, the use of traditional methods for calculating durability indicators is very problematic. Therefore, the use of mathematical apparatus of functional analysis can improve the accuracy of prediction of the state of complex technical systems. For this purpose, two classes of operators are considered: the microscopic and macroscopic entropy operators and the operator of the internal time of the life cycle of systems in the modes «past-present-future». The views and concepts of philosophical and scientific thought about the nature of time, as well as the postulates of the modes “past-present-future” are analyzed in detail. Deterministic and probabilistic-statistical methods for assessing durability indicators are shown to require a large amount of both experimental data and data on actual operation of objects, which is often difficult to accomplish. The introduction of the new concept into the theory of durability of complex technical systems “internal” time plays an important role in the transition from a dynamic, reversible description of the functioning characteristic of classical mechanics to a probabilistic description. The internal time of the equipment of complex technical systems is fundamentally different from astronomical time, although both have the same dimension. It’s considered appropriate to use new mathematical methods of functional analysis for the development of specific engineering methods for assessing the durability of complex critical systems of long-term use, taking into account the asymmetry effect of internal time.

[1] Работа выполнена при поддержке РФФИ (Проект № 17-01-00244).

© Острейковский В. А., Лысенкова С. А., Шевченко Е. Н., 2019

для классической механики, к вероятностному описанию. *Выводы*. Внутренне время оборудования сложных технических систем в корне отличается от астрономического времени, хотя оба имеют одинаковое измерение. Считается целесообразным применять новые математические методы функционального анализа для развития конкретных инженерных методик оценки долговечности сложных критически важных систем длительного использования с учетом эффекта асимметрии внутреннего времени.

Ключевые слова: асимметрия времени, неустойчивость, необратимость, ресурс, срок службы.

Keywords: time asymmetry, instability, irreversibility, resource, service life.

Введение

Классическая теория техногенной безопасности на основе теоретико-вероятностной математики и детерминированных необратимых процессов эрозионно-коррозионного износа не позволяет корректно прогнозировать во времени значения характеристик долговечности современных сложных высокоопасных динамических объектов, таких как ядерные и тепловые энергетические установки, летательные аппараты, объекты добычи, транспортировки и переработки в нефтегазовой отрасли. Это происходит из-за того, что в моделях надежности и безопасности указанных сложных критически важных систем со временем эксплуатации 30–50 и более лет, как правило, не учитывается эффект асимметрии времени «прошлое – настоящее – будущее». Напрашивается вопрос: как могли произойти катастрофы на атомной станции «Фукусима» (2011) и разлив нефти в Мексиканском заливе (2010), если после катастрофы на Чернобыльской АЭС (1986) в развитых странах были предприняты чрезвычайные (в том числе технологические) меры по предупреждению глобальных катастрофических событий? Вполне возможно, что подобные меры пока не привели к кардинальному повышению характеристик ресурса и срока службы высокоопасных структурно и функционально сложных критически важных систем.

Постановка задачи

Так как в задачах прогнозирования состояния структурно и функционально сложных систем (СФСС) длительного использования чрезвычайно остро стоит вопрос оценки показателей долговечности, то весьма актуальным является на всех этапах жизненного цикла таких систем определение характеристик остаточного ресурса и срока службы их оборудования. Одним из путей решения подобного рода задач может быть предложен подход применения к задачам долговечности методов современного функционального анализа. Решению этого вопроса и посвящена предлагаемая статья.

Краткая историческая справка

На протяжении двадцати пяти столетий феномен времени остается в фокусе внимания философской и научной мысли, демонстрируя свою глубину и многоаспектность в многочисленных трактатах, акцентирующих внимание на отдельных ракурсах проблемы.

Концепции времени античной и средневековой философии. Наиболее содержательные концепции времени в эпоху античности были созданы выдающимися мыслителями эпохи классики Платоном и Аристотелем. С точки зрения этих мыслителей время является неотъемлемой характеристикой и условием существования вещей.

Согласно субстанциальной модели, время есть независимая сущность, которая является условием существования вещей, но не их состоянием или атрибутом (Б. Спиноза, И. Ньютон). Кроме того, по Ньютону, размышляя о сущности времени, необходимо различать его математическое и обыденное истолкования или, иначе говоря, различать абсолютное и относительное время.

В реляционной модели Г. В. Лейбница никакого абсолютного времени не существует, есть лишь собственные длительности конкретных вещей, их «внутренние времена», недоступные наблюдателю в опыте.

Чрезвычайно содержательную концепцию времени предложил Р. Декарт. Он, по сути, устранил время как абсолютную внешнюю точку отсчета изменений объекта, поместив его внутрь самого объекта, сделав время «внутренним» и тем самым невидимым или несуществующим для наблюдателя.

С точки зрения И. Канта, время не существует объективно, само по себе, вне вещей и вне нашего сознания. Как и пространство, оно относится к априорным (внеопытным) формам чувственности, которые не существуют вне субъекта и являются всего лишь субъективными схемами восприятия реальности.

В онтологии Г. Ф. В. Гегеля время отождествляется со становлением и движением, а потому оно не универсально и не всеобще, поскольку имеет отношение только к конечному, преходящему бытию вещей. Целое же существует вне времени [2–4].

Природа времени в философии и естествознании XX–XXI вв. В фокусе внимания размышлений о природе и свойствах времени, получивших развитие в XX в., постоянно находились идеи «внутреннего времени» объекта – будь то вещь или живой организм, а также проблема происхождения, порождения времени. Многие наиболее значимые философские концепции природы времени получили убедительное естественнонаучное обоснование. Среди самых перспективных в отношении дальнейшей разработки и при этом самых дискутируемых следует назвать концепции А. Бергсона, В. И. Вернадского, М. Хайдеггера.

Время есть длительность, т.е. нерасчленимая целостность, предполагающая единство всех событий и состояний объектов, взаимодетерминацию всех модусов времени – прошедшего прошлого, наличного настоящего и возможного (но не предопределенного жестко) будущего. Ничто не существует вне времени, и тем самым время есть всеобщий атрибут – и вещей, и организмов, и бытия в целом (А. Бергсон).

Поскольку каждый организм обладает «внутренним временем», измерение времени представляет собой соотнесение каждый раз специфичного «внутреннего времени» с конвенционально принятой системой отсчета (В. И. Вернадский).

По мысли М. Хайдеггера, время не одномерно и должно рассматриваться в единстве с пространством, а также в единстве своих измерений – прошлого, настоящего и будущего. Модусы (части) времени не равноправны – прошлое и будущее оцениваются исходя из настоящего, причем они *не* симметричны относительно этой границы между ними. Настоящее обладает протяженностью, образуя единство с прошлым и будущим, как бы «прорастая» в них [2–4].

Постулаты модусов времени «прошлое – настоящее – будущее»

Постулат, вытекающий из теории марковских процессов. Марковский процесс, процесс без последействия – это случайный процесс, эволюция которого после любого заданного значения временного параметра t не зависит от эволюции, предшествующей t, при условии, что значение процесса в этот момент фиксировано (т.е. «*будущее*» и «*прошлое*» процесса не зависят друг от друга при известном «*настоящем*»).

Иными словами, *марковский процесс – это процесс, в котором будущая эволюция состояния объекта зависит только от настоящего текущего состояния*. Для объекта с непрерывным временем это означает, что процесс локален во времени, т.е. эффекты памяти отсутствуют.

Постулат Шеннона. Любой математический аппарат прогнозирования является бесполезным, если не учитывается физическая сущность прогнозируемых процессов. Определение закономерностей изменения физических процессов деградации оборудования СФСС в задачах прогнозирования должно базироваться на одном из центральных фундаментальных постулатов физики о сохранении сущности физических процессов при прогнозировании поведения объектов: *основные закономерности, наблюдавшиеся в прошлом, будут сохранены в будущем.* При этом процесс функционирования СФСС должен рассматриваться как последовательная смена ее состояний под действием внешних и внутренних факторов.

Постулат Седякина. Опираясь на понятие ресурса, представляется возможным сформулировать один из законов теории надежности, суть которого заключается в следующем: *надежность объекта зависит от величины выработанного им ресурса в прошлом и не зависит от того, как выработан этот ресурс*.

Постулат Ляпунова. Для поведения хаотических динамических систем понятие траектории утрачивает смысл через некоторое характерное время (время Ляпунова). Под хаосом будем понимать поведение системы, при котором первоначально близкие траектории экспоненциально разбегаются со временем. При этом режим называется хаотическим, если расстояние между любыми двумя точками первоначально сколь угодно малое экспоненциально возрастает со временем. Постулат А. М. Ляпунова формулируется следующим образом: *разбегание траекторий описывается функцией* exp(t/τ), *где* 1/τ *– для хаотических систем по определению положительная величина*. Величина 1/τ называется показателем Ляпунова, а само τ – временем Ляпунова [15].

Постулаты Пригожина. Существуют три формы законов природы:

1) первая форма законов оперирует траекториями в классической механике и волновыми функциями в квантовой механике (И. Ньютон);

2) вторая форма законов – статистическая формулировка законов природы (Дж. Гиббс, А. Эйнштейн) «приводима» или «сводима»;

3) третья формулировка законов природы: законы хаоса носят вероятностный характер, но недостоверный.

Законы, управляющие поведением устойчивых систем, детерминистичны и обратимы во времени. И, наоборот, законы, описывающие хаотические системы, соответствуют вероятностям и включают в себя необратимость.

Теперь можно сформулировать постулаты И. Р. Пригожина:

1) хаос приводит к включению стрелы времени в фундаментальное динамическое описание поведения системы. Эволюция систем при $t \to +\infty$ и при $t \to -\infty$ различна;

2) все системы, допускающие несводимое вероятностное описание, считаются хаотическими;

3) законы, описывающие хаотические системы, соответствуют вероятностям и включают в себя необратимость [1, 6, 7].

Феноменология методов оценки остаточного ресурса оборудования сложных систем

Детерминированный метод

Пример 1. Расчет остаточного ресурса трубопроводов атомных электростанций (АЭС) при эксплуатации.

В качестве примера рассмотрим расчет скорости эрозионно-коррозионного износа (ЭКИ) элементов трубопроводов АЭС по данным контроля при эксплуатации, изложенным в работе [8]. В этой работе приведена методика расчета скорости ЭКИ и остаточного срока службы элементов прямых участков трубопроводов, их гибов и околошовных зон. «Данная методика оценки скорости ЭКИ применена к расчету скорости коррозии, усиливаемой потоком, на прямых участках трубопроводов:

$$W_{\text{утн}} = \left[\left(S_{\text{ном}} K_{11} K_{12} - S_{\text{мин}} K_2\right)\right] K_{\text{без}} \big/ \Delta\tau_0 , \tag{1}$$

где $S_{\text{ном}}$, $S_{\text{мин}}$ – соответственно номинальная и минимальная толщины стенки; K_{11} – коэффициент, учитывающий положительный допуск на толщину стенки при изготовлении трубопровода; K_{12} – коэффициент вклада отложений продуктов коррозии в номинальную толщину стенки; K_2 – коэффициент, учитывающий вклад отложений продуктов коррозии при замере минимальной толщины стенки $S_{\text{мин}}$; $K_{\text{без}}$ – коэффициент безопасности; $\Delta\tau_0$ – длительность эксплуатации элемента до даты проведения контроля…

Остаточный срок эксплуатации элемента трубопровода рассчитывается по уравнению

$$\tau = \left(S_{\text{мин}} - S_{\text{доп}}\right) \big/ W_{\text{утн}} , \tag{2}$$

где $S_{\text{доп}}$ – допускаемая толщина стенки трубопровода…

…Геометрические особенности таких элементов, как гибы и околошовные зоны, требуют корректировки данной методики и учета фактической толщины этих элементов» [8, с. 84–85].

В результате расчетов на большом экспериментальном материале авторы статьи [8] пришли к следующему заключению в п. 5: «…Неоднозначность выводов требует использовать все результаты

для принятия решения о проведении повторного контроля при приближении к минимальному из рассчитанных времен.

И это, к примеру, для случая «расчета скорости ЭКИ и остаточного ресурса гибов по данным замеров на гибах 06-К и 16К трубопроводов питательной воды 273×16 мм АЭС «Дукованы», выполненных при эксплуатационном контроле в 1995, 1996, 2000 и 2002 гг. с большим количеством замеров на каждом элементе (от 276 до 394)» [8, с. 89, 91].

О чем все это вышеизложенное говорит: расчет остаточного ресурса объектов на основе даже большого объема статистических данных с применением детерминистического подхода требует высокой степени осторожности в оценке остаточного ресурса.

Пример 2. Расчет остаточного ресурса нефтепромысловых трубопроводов. «Среднюю скорость коррозии стенки трубопровода определяют по формуле

$$V_{\text{ср}} = \frac{S_{\text{ном}} - S_{\text{мин}}}{\tau}, \tag{3}$$

где $S_{\text{ном}}$ – номинальная толщина стенки; τ – время эксплуатации трубопровода в годах» [10, с. 421].

Пример 3. Расчет остаточного ресурса изоляционных покрытий промысловых трубопроводов нефти и газа.

«Зная закономерности влияния времени и комплекса основных факторов на срок службы изоляционных покрытий, можно сделать в период проектирования конкретного трубопровода оптимальный выбор изоляционных покрытий, их толщину и количество слоев.

Защитные свойства изоляционных покрытий наиболее полно характеризуются *переходным сопротивлением*, представляющим собой *интегральную оценку* защитной способности системы *труба – покрытие – грунт*.

При помощи этого показателя с достаточной степенью точности можно оценить достоинства и недостатки того или иного изоляционного материала и влияние на покрытие внешних условий. Кроме того, переходное сопротивление позволяет оценить состояние изоляционных материалов в процессе эксплуатации без нарушения целостности и вскрытия траншеи…

…В результате анализа различных методов прогнозирования изменения защитных свойств изоляционных покрытий трубопроводов выявлены три основные зависимости, описывающие изменение основного критерия оценки качества изоляции – переходного сопротивления труба – земля:

$$R_{\text{п}} = R_{\text{п.н}} e^{-\beta\tau}, \tag{4}$$

$$R_{\text{п}} = R_{\text{к}} \left(\frac{R_{\text{п.н}}}{R_{\text{к}}} \right)^{\frac{\tau_{\text{с}}}{\tau_{\text{с}}+\tau}}, \tag{5}$$

$$R_{\text{п}} - R_{\text{к}} = \left(R_{\text{п.н}} - R_{\text{к}} \right) e^{-a\tau}, \tag{6}$$

где β – показатель скорости старения изоляционного покрытия, 1/год; $\tau_{\text{с}}$ – постоянная времени старения изоляционного покрытия, лет; τ – время эксплуатации, лет; $R_{\text{п.н}}$ – начальное значение переходного сопротивления, Ом·м^2; $R_{\text{к}}$ – конечное значение переходного сопротивления, Ом·м^2; a – постоянный коэффициент, показатель скорости старения изоляции, 1/год…

…Результаты анализа зависимости для прогнозирования изменения переходного сопротивления изоляционных покрытий показали, что, решая обратную задачу можно определить срок службы изоляционных покрытий…

…Расчет остаточного ресурса службы изоляции можно производить по формуле [10, с. 391–395]:

$$\tau = \frac{1}{a} \ln \left(\frac{R_{\text{п.н}} - R_{\text{к}}}{10^3 - R_{\text{к}}} \right). \tag{7}$$

Вероятностно-статистический метод

Пример 4. Расчет остаточного ресурса промысловых трубопроводов нефти и газа при эксплуатации.

«При прогнозировании остаточного ресурса трубопровода по изменению текущей толщины стенки и при постоянном значении допускаемого напряжения единственной характеристикой технического состояния является износ стенки…Тогда внутреннее давление P_0, которое может выдержать элемент трубопровода определяется по формуле [11]

$$P_0 = \frac{2SR_1}{n\alpha D_н}, \tag{8}$$

где S – толщина стенки; R_1 – расчетное сопротивление материала трубопровода; n – коэффициент перегрузки рабочего давления в трубопроводе, равный 1,2; α – коэффициент несущей способности; $D_н$ – наружный диаметр трубопровода.

Текущая толщина стенки равна

$$S = S_{ном} - \Delta_0 - \Delta, \tag{9}$$

где $S_{ном}$ – номинальная толщина стенки; Δ_0 – начальное технологическое изменение толщины стенки; Δ – износ стенки.

Прочность трубопровода при эксплуатации обеспечена, если допускаемое давление выше рабочего. Это условие с учетом (9) может быть записано в виде

$$P_{оп}\left(1 - \delta_0 - \delta\right) \geq P, \tag{10}$$

где $P_{оп} = \frac{2S_nR_1}{n\alpha D_n}$; $\delta_0 = \frac{\Delta_0}{S_n}$; $\delta = \frac{\Delta}{S_n}$...

…В соответствии с (10) условие прочности трубопровода в терминах относительного износа можно представить в виде

$$[\delta] \leq \delta; \tag{11}$$

$$[\delta] = 1 - \frac{S_R}{S_n} - \delta_0, \tag{12}$$

где $[\delta]$ и δ – допускаемый и текущий относительный износ стенки соответственно; δ_0 – начальное изменение толщины стенки; $\frac{S_R}{S_n} = \frac{P}{P_{оп}}$ …

…Процесс износа стенки можно описать степенной зависимостью

$$\delta = a\tau^m, \tag{13}$$

где a – случайный, m – детерминированный параметры.

Естественно полагать, что параметры имеют нормальное распределение.

При $m = 1$ износ осуществляется с постоянной скоростью (линейный случай), при $m > 1$ процесс износа ускоряется, при $m < 1$ – замедляется. Параметр может быть определен по результатам статистической обработки замеров толщины стенки…

…Вероятность выполнения условия (11), т.е. вероятность безотказной работы (ВБР) на интервале времени от 0 до (времени эксплуатации трубопровода на момент диагностирования), является функцией безотказности и обозначается как

$$p(t_\alpha) = P_r\left\{|\delta| \leq \delta, 0 \leq \tau \leq \tau_\alpha\right\}, \tag{14}$$

где P_r – вероятность события.

Один из основных показателей долговечности трубопроводов – гамма-процентный ресурс – получается из решения следующего уравнения:

$$\frac{\gamma}{100} = \frac{p\left(t_\alpha + \tau_{\text{ост}}\right)}{p\left(\tau_\alpha\right)}, \tag{15}$$

где $\frac{\gamma}{100}$ – условная вероятность безотказной работы; $\tau_{\text{ост}}$ – гамма-процентный остаточный ресурс.

Величину % выбирают в зависимости от ответственности трубопровода в пределах от 90 до 99.

Учитывая, что параметры $[\delta]$ и δ имеют нормальное распределение, для вероятности безотказной работы на интервале от 0 до τ_α получается в соответствии с (15) выражение

$$p\left(\tau_\alpha\right) = \Phi\left(\frac{[\delta]_{\text{ср}} - a_{\text{ср}}\tau_\alpha^m}{\sqrt{\sigma_{[\delta]}^2 + \sigma_a^2\tau_\alpha^{2m}}}\right), \tag{16}$$

где Φ – табулированная функция Лапласа.

…В условиях эксплуатации «при прогнозировании остаточного ресурса трубопровода возможна ситуация, когда данные об износе его элементов имеются не в полном объеме. Но имеются данные по отказам и информация о величине общего (среднего) износа на момент диагностирования. Тогда величина общего износа равна произведению средней скорости износа $V_{\text{ср}}$ на величину наработки к моменту диагностирования [11]

$$\Delta_{\text{ср}} = V_{\text{ср}}\tau_\alpha ... \tag{17}$$

…Предположим, что условие прочности трубопровода имеет вид (12), но рассеиванием можно пренебречь, тогда формулы для определения $[\delta]$

$$[\delta] = 1 - \frac{S_R}{S_n}. \tag{18}$$

…При детерминированном параметре $[\delta]$ формула (16) для вероятности безотказной работы на момент диагностирования τ_α имеет вид

$$p\left(\tau_\alpha\right) = \Phi\left(\frac{[\delta] - a_{\text{ср}}\tau_\alpha}{\sigma_a\tau_\alpha}\right). \tag{19}$$

Опуская промежуточные выкладки, получаем выражение для расчета остаточного ресурса

$$\tau_{\text{ост}} = \frac{[\delta] - \delta_{\text{ср}}}{\dfrac{[\delta]}{V_{1-\alpha}/V_{\gamma(1-\alpha)}} + \delta_{\text{ср}}}\tau_\alpha, \tag{20}$$

где $V_{1-\alpha}$ и $V_{\gamma(1-\alpha)}$ – квантили нормального распределения.

В данном выражении $[\delta]$ вычисляется по формуле (18), а

$$\delta_{\text{ср}} = a_{\text{ср}}\tau_\alpha = \frac{V_{\text{ср}}}{S_n}\tau_\alpha. \tag{21}$$

Задавая величину средней скорости износа $V_{\text{ср}}$ по формулам (20) и (21), можно определить остаточный ресурс трубопровода. Отметим, что в расчете по данной методике не используется понятие доверительной вероятности, так как задается априорное значение скорости износа.

Описанный метод расчета по числу отказов целесообразно применять только для ориентировочных расчетов, так как учитываются лишь те отказы, которые связаны с износом трубопровода и возникшей течью. Также необходимо располагать априори данными по скорости общей коррозии.

Достоинством предлагаемого метода оценки остаточного ресурса является то, что рассеивание параметров износа можно определить по относительному числу отказов. Физическую природу этих отказов при принятых ограничениях можно пока не учитывать, поэтому метод может быть распространен и на другие типы разрушения» [10, с. 421–430].

Недостатком приведенных в п.1 и 2 литературных источников по оценке остаточного ресурса является неучет влияния изменения состояния исследуемых объектов в процессе их длительной эксплуатации.

Модели внутреннего времени

Изложенные в пп. 3.1 и 3.2 этой статьи методы оценки времени жизни сложных систем не учитывают понятие «возраст системы», т.е. в рассмотренных моделях нет анализа эффекта асимметрии времени. Поэтому необходим новый подход к оценке параметров долговечности в модусах «прошлое – настоящее – будущее».

Один из таких подходов предложен в работах научной школы И. Р. Пригожина [12] и развит в работах [1–7] авторами настоящей статьи.

Математической базой подхода оказалась теория операторов современного функционального анализа модели внутреннего времени.

Математические модели асимметрии внутреннего времени. Известно, что энтропия задает стрелу времени. Следовательно, нам необходима новая функция распределения, которая нарушала бы симметрию времени.

С этой целью использован переход к операторному языку. Учитывая, что необратимость есть проявление в макроскопическом масштабе стохастичности, в работе [12] проведена тонкая классификация систем на «*внутренние случайные*», допускающие отображение на цепь Маркова, и «*внутренние необратимые*», приводящие к внутреннему различию между прошлым и будущим. С этой целью можно сопоставить системе новый тип времени – оператор времени T, который тесно связан с оператором энтропии M. Так как T – оператор, то он имеет собственные значения, каждое из которых имеет возможный возраст системы. А любое заданное начальное распределение ρ обычно может быть разложено на сумму членов, *различных по возрасту и типу эволюции.* Таким образом, возможно непротиворечивым образом включить необратимость в динамическое описание систем [13–15].

Опуская промежуточные выкладки и доказательства, приведенные в [12, с. 162–163, 220–225], можно получить следующее «соотношение между унитарным оператором $U = e^{-iLt}$ и оператором T:

$$U_t^T T U_t = T + tI \ , \tag{22}$$

где L – линейный оператор Лиувилля, а I – единичный оператор Лиувилля.

Соотношение (22) особенно удобно для описания дискретных отображений, например, таких как преобразование пекаря, в которых t изменяется с единичным шагом.

Физический смысл оператора времени T – это *нелокальный* оператор, порождающий новое описание классической динамики, справедливое для сильно неустойчивых систем, например, таких какие описаны в пп. 1, 2 настоящей статьи.

Полная система собственных функций оператора T получается, если взять все возможные конечные произведения функций χ_n

$$\chi_n = U^n \chi_0 \, . \tag{23}$$

Каждое такое произведение соответствует собственному значению m оператора T, где m – наибольший из индексов n функций χ_n, входящих в произведение…

Собственные функции $\varphi_{n,i}$ оператора T вместе с постоянной функцией I образуют полную систему ортогональных функций.

Каждая функция распределения состояния системы ρ допускает разложение по собственным функциям $\{I, \varphi_{n,i}\}$:

$$\rho = 1 + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n \varphi_n \ , \tag{24}$$

где n – собственные значения оператора T, i – степень вырождения собственного значения n.

Обозначим через $\overline{\rho}$ избыток ρ по сравнению с равномерным равновесным распределением:

$$\overline{\rho} = \rho - 1 = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} c_n \varphi_n \ . \tag{25}$$

Предположим, что функция распределения имеет нулевой возраст и соответствует χ_0:

$$\rho = 1 + \chi_0 \ . \tag{26}$$

В этом случае система находится в правой половине фазового пространства, но мы не располагаем никакой другой информацией относительно локализации системы. Наоборот, если известна точная локализация системы, то функция распределения ρ имеет вид δ-функции и

$$\rho = \delta_{\omega 0}(x, y) = \delta(x - x_0)\delta(y - y_0) = 1 + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \varphi_n(x_0, y_0)\varphi_n(x, y) \ . \tag{27}$$

Все возрасты входят в (27) с равными весами. Итак, существует своего рода *дополнительность* между описанием на языке точек в фазовом пространстве и «разбиений», соответствующих различным внутренним возрастам. Следовательно, внутренний возраст дает нам новое *нелокальное* описание системы.

Если оператор внутреннего времени существует, то каждому состоянию системы ρ мы можем приписать средний возраст $\langle T \rangle_\rho$ по формуле

$$\langle T \rangle_\rho = \frac{\langle \overline{\rho}, T\overline{\rho} \rangle}{\langle \overline{\rho}, \overline{\rho} \rangle} \ . \tag{28}$$

Используя выражение (25) и ортонормированность функций φ_n, можно преобразовать правую часть (28) к виду

$$\langle T \rangle \rho = \frac{\sum n c_n^2}{\sum c_n^2} = \langle n \rangle \ . \tag{29}$$

Из соотношения (22), как нетрудно проверить, следует, что

$$\langle T \rangle_{\rho_t} = \langle T \rangle_{\rho_0} + t_1 \ , \tag{30}$$

т.е. средний возраст состояния ρ *«идет в ногу» с внутренним временем или временем t, отсчитываемым по обычным часам.*

Вместе с тем внутреннее время существенно отличается от внешнего времени, отсчитываемого по наручным часам. Оно скорее соответствует возрасту человека. Возраст не определяется какой-нибудь частью тела, изолированной от остального организма, а соответствует средней, глобальной оценке, относящейся ко всем частям тела [12, с. 200–202]». Причем это относится не только к биологическим системам, а и ко всем остальным окружающим нас сложным динамическим системам.

Моделирование внутреннего времени в модусах «прошлое – настоящее – будущее». Будем исходить из кардинального вопроса: как изменяется время в триаде «прошлое – настоящее – будущее». Один из вариантов ответа на этот чрезвычайно актуальный для науки вопрос изложен в [12, с. 203–205]. Действительно, имея понятие внутреннего времени, можно «построить оператор, нарушающий симметрию преобразования Λ, который позволяет осуществить переход от унитарной группы U_t к полугруппе W_t, ведущей к равновесному состоянию при $t \to \infty$. С этой целью необходимо ввести убывающую функцию $\Lambda(T)$ внутреннего времени. Как известно,

$$T\varphi_n = n\varphi_n \ . \tag{31}$$

Следовательно,

$$\Lambda(T)\varphi_n = \lambda_n \varphi_n \ . \tag{32}$$

Поскольку $\Lambda(T)$ – убывающая функция внутреннего времени T, должны выполняться неравенства (33) [12, с. 203]»

$$0 \le \lambda_{n+1} \le \lambda_n . \tag{33}$$

Используя функцию Ляпунова и распределение вероятностей $\bar{\rho}$, а также (33), можно получить следующее:

$$0 \le \lambda_n \le 1 ;\ \lambda_n \to 1 \text{ при } n \to -\infty ,$$

$$\lambda_n \to 0 \text{ при } n \to +\infty$$

и

$$\frac{\lambda_{n+1}}{\lambda_n} \to 0 \text{ при } n \to \infty . \tag{34}$$

Учитывая, «что Λ действительно переводит динамическую группу U_t в *сжимающую* полугруппу, операторы U_t сохраняют меру, так как (при $t = m$)

$$U_m \varphi_n = \varphi_{n+m} . \tag{35}$$

«Иначе ведут себя операторы W_t [12, с.195]:

$$W_m \varphi_n = \Lambda U_m \Lambda^{-1} \varphi_n = \Lambda U_m \frac{\varphi_n}{\lambda_n} = \Lambda \frac{\varphi_{n+m}}{\lambda_n} = \frac{\lambda_{n+m}}{\lambda_n} \varphi_{n+m} . \tag{36}$$

Из неравенств (33) следует, что площадь, соответствующая функции φ_n, со временем сжимается. Неравенствам (33) и (36) могут удовлетворить значения λ_n, которые можно выбрать или задать в более общем виде, например $\lambda_n = \exp[-\varphi(n)]$, где $\varphi(n)$ – любая выпуклая функция от n».

$$\lambda_n = \frac{1}{1+a^n} = \frac{1}{1+e^{t/\tau_c}} ,\ a > 1,\ \ln a = 1/\tau_c. \tag{37}$$

Рассмотрим физический смысл образов $\bar{\rho}$-состояний ($\bar{\rho} = \Lambda \rho$). И ρ, и $\bar{\rho}$ при заданном значении временного параметра t в общем случае содержат вклады, приходящие из прошлого и будущего, и интерпретируемые в смысле *внутреннего времени T*. Но если в ρ прошлое и будущее входят симметрично, то в $\bar{\rho}$ симметрия между прошлым и будущим нарушается: вклад будущих состояний «подавлен». В настоящее вносят вклад «прошлое» и лишь «ближайшее» будущее. Этим рассматриваемый случай отличается от детерминистических систем, в которых из настоящего следует как прошлое, так и будущее. Рассмотрим λ_n как функцию от n (рис. 1).

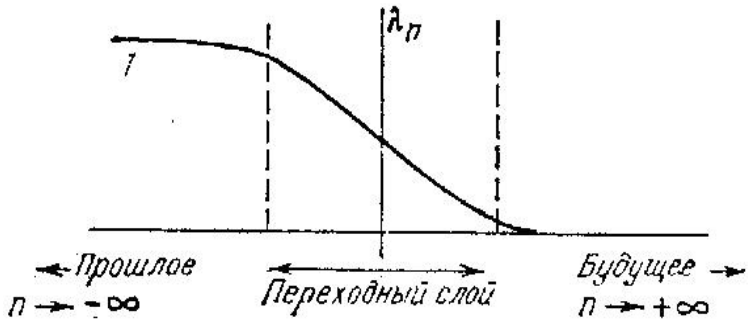


Рис. 1. Переход от прошлого ($n \to -\infty$) к будущему ($n \to +\infty$)

Из представления (37) следует, что ширина переходного слоя между прошлым и будущим по порядку величины сравнима с характерным временем τ_c. Резкий переход от прошлого к будущему возникает только в том случае, если $\tau_c \to 0$ (рис. 2).

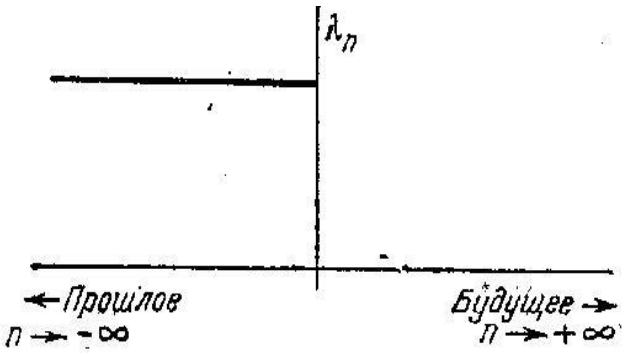


Рис. 2. Переход от прошлого ($n \to -\infty$) к будущему ($n \to +\infty$) в пределе $\tau_c \to 0$

Можно видеть, сколь сильно отличается описание внутреннего времени от традиционного представления о времени как о величине, изоморфной прямой (рис. 3), идущей из далекого прошлого ($t \to -\infty$) в далекое будущее ($t \to +\infty$) [6, 15, 16].

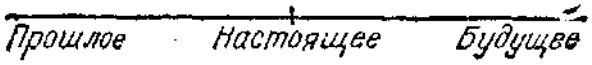


Рис. 3. Традиционное представление о времени

Настоящее в таком представлении соответствует единственной точке, отделяющей прошлое от будущего. Настоящее возникает ниоткуда и исчезает в никуда. Стянутое в точку, оно бесконечно близко и прошлому и будущему. В традиционном представлении между прошлым, настоящим и будущим нет расстояний. В нашем представлении прошлое отделено от будущего интервалом, длина которого определяется характерным временем τ_c, и настоящее обретает *продолжительность*» [12, с. 204–205].

Заключение

1. Феноменология методов оценки остаточного ресурса оборудования сложных систем на основе чисто детерминированного подхода требует большого объема статистических данных реальной эксплуатации объектов, что часто трудно выполнить. Результаты подобных расчетов показателей долговечности даже при достаточно обширных статистических данных свидетельствуют о высокой степени осторожности в оценке полученных результатов [17–18].

2. Использование вероятностно-статистических методов по числу отказов объектов несомненно повышает достоверность получаемых результатов в решении задач оценивания показателей долговечности оборудования сложных систем длительного использования. Однако эти результаты также обладают значительной степенью неопределенности из-за введения понятий доверительных интервалов.

3. Сочетание детерминированных и вероятностно-статистических методов может увеличить достоверность оценок остаточного ресурса и срока службы исследуемых систем. Однако в силу отмеченных в данной статье недостатков этих подходов их целесообразно применять только для ориентировочных расчетов.

4. Введение нового понятия «внутреннее время» играет важную роль в переходе от динамического, обратимого во времени описания функционирования систем, характерного для классической механики, к вероятностному описанию.

5. Поэтому предлагаются новые математические методы фундаментального подхода к оценке ресурса и срока службы сложных динамических систем с использованием аппарата теории операторов современного функционального анализа.

6. Авторы статьи считают целесообразным применять новые модели для развития конкретных инженерных методик теории долговечности сложных систем длительного использования с учетом эффекта асимметрии внутреннего времени.

7. Внутреннее время в корне отличается от астрономического времени, хотя оба они имеют одинаковое измерение.

8. Внутреннее время имеет совершенно иной смысл, так как возникает из-за случайного поведения траекторий, встречающегося в неустойчивых и необратимых динамических системах.

Библиографический список

1. *Острейковский, В. А.* Феномен «время» в теории прогнозирования техногенного риска сложных динамических систем / В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко // Надежность и качество сложных систем. – 2016. – № 4. – С. 3–12.
2. *Острейковский, В. А.* Феномен асимметрии внутреннего времени при прогнозировании состояния сложных динамических систем / В. А. Острейковский, Т. Ю. Денисова, Е. Н. Шевченко // Вестник кибернетики. – 2017. – № 4 (28). – С. 181–188.
3. *Денисова, Т. Ю.* Философский и научный подходы к пониманию времени: перспективы синтеза / Т. Ю. Денисова // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2017. – № 3 (98), ч. III. – С. 161–165.
4. *Денисова, Т. Ю.* Образ времени в мифологических моделях античности / Т. Ю. Денисова // Исторические, философские, политические и юридические науки, культурология и искусствоведение. Вопросы теории и практики. – 2017. – № 3-1 (77). – С. 58–63.
5. *Муравьев, И. И.* Модели оценки фактора времени в теории техногенного риска динамических систем / И. И. Муравьев, В. А. Острейковский, Е. Н. Шевченко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 24–27.
6. *Острейковский, В. А.* Постулаты парадокса времени в теории прогнозирования техногенного риска сложных систем / В. А. Острейковский // Перспективные направления развития отечественных информационных технологий : материалы II Межрегион. науч.-практ. конф. (Севастополь, 13–17 сентября 2016 г.) / науч. ред. Б. В. Соколов. – Севастополь : СевГУ, 2016. – С. 105–106.
7. *Муравьев, И. И.* Постулаты стрелы времени в теории прогнозирования техногенного риска сложных динамических систем / И. И. Муравьев, В. А. Острейковский // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии : материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. (Сочи, 1–10 октября 2016 г.). – Сочи, 2016. – С. 291–293.
8. *Бараненко, В. И.* Расчет скорости коррозии и остаточного ресурса элементов трубопроводов АЭС по данным контроля / В. И. Бараненко, О. М. Гулина, Н. Л. Сальников // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2017. – № 4. – С. 83–93.
9. *Антонов, А. В.* Ресурс и срок службы оборудования энергоблоков атомных станций (на примере энергоблоков Смоленской АЭС) / А. В. Антонов, В. А. Острейковский. – Москва : Инновационное машиностроение, 2017. – 536 с.
10. Промысловые трубопроводы и оборудование : учеб. пособие для вузов / Ф. М. Мустафин, Л. И. Быков, А. М. Гумеров, Г. Г. Васильев, А. Д. Прохоров, О. П. Квятковский, И. Ш. Гамбург, Ю. И. Спектор. – Москва : Недра, 2004. – 662 с.
11. ОСТ 153.39.4.010–2002. Методика определения остаточного ресурса нефтегазопромысловых трубопроводов. – Москва : Изд-во УГНТУ, 2002. –57 с.
12. *Пригожин, И.* От существующего к возникающему. Время и сложность в физических науках : пер. с англ. / под ред. Ю. Л. Климонтовича. – Изд. 2-е, доп. – Москва : Едиториал УРСС, 2002. – 288 с.
13. *Пригожин, И. Р.* Конец определенности. Время. Хаос и новые законы природы / И. Р. Пригожин. – Ижевск : Регулярная и хаотическая динамика, 2000. – 208 с.
14. *Белов, С. В.* Парадоксы времени / С. В. Белов // Природа России. – URL: http://www.priroda.ru/reviews/detail.php?ID = 11383
15. *Ляпунов, А. М.* Собрание сочинений / А. М. Ляпунов. – Москва ; Ленинград, 1956. – Т. 2. – 263 с.
16. *Хакен, Г.* Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах / Г. Хакен. – Москва : Мир, 1985. – 415 с.
17. Time Factor in the Theory of Anthropogenic Risk Prediction in Complex Dynamic Systems / V. A. Ostreikovsky, E. N. Shevchenko, N. K. Yurkov, I. I. Kochegarov, A. K. Grishko // Journal of Physics : Conference Series. – 2018. – Vol. 944, iss. 1. – P. 1–10. – DOI 10.1088/1742-6596/944/1/012085/
18. Determination of Vibrational Displacement Measurement Error Based on the Blurring Analysis of a Round Mark Image / A. Grigorev, A. Lysenko, I. Kochegarov, V. Roganov, J. Lavendels // Applied computer systems. – Vol. 23, № 2. – P. 150–160. – DOI: 10.2478/acss-2018-0019.

References

1. Ostreykovskiy V. A., Shevchenko E. N. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2016, no. 4, pp. 3–12. [In Russian]
2. Ostreykovskiy V. A., Denisova T. Yu., Shevchenko E. N. *Vestnik kibernetiki* [Bulletin of Cybernetics]. 2017, no. 4 (28), pp. 181–188. [In Russian]

3. Denisova T. Yu. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk* [Actual problems of Humanities and natural Sciences]. 2017, no. 3 (98), part III, pp. 161–165. [In Russian]
4. Denisova T. Yu. *Istoricheskie, filosofskie, politicheskie i yuridicheskie nauki, kul'turologiya i iskusstvovedenie. Voprosy teorii i praktiki* [Historical, philosophical, political and legal Sciences, cultural studies and art history. Theory and practice issues]. 2017, no. 3-1 (77), pp. 58–63. [In Russian]
5. Murav'ev I. I., Ostreykovskiy V. A., Shevchenko E. N. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2015, vol. 1, pp. 24–27. [In Russian]
6. Ostreykovskiy V. A. *Perspektivnye napravleniya razvitiya otechestvennykh informatsionnykh tekhnologiy: materialy II Mezhregion. nauch.-prakt. konf. (Sevastopol', 13–17 sentyabrya 2016 g.)* [Promising directions of development of domestic information technologies : materials II inter-region. science.-prakt. conf. (Sevastopol, 13–17 September 2016))]. Sevastopol: SevGU, 2016, pp. 105–106. [In Russian]
7. Murav'ev I. I., Ostreykovskiy V. A. *Innovatsionnye, informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii: materialy XIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (Sochi, 1–10 oktyabrya 2016 g.)* [Innovative, information and communication technologies : proceedings of XIII international. science.-prakt. conf. (Sochi, 1–10 October 2016)]. Sochi, 2016, pp. 291–293. [In Russian]
8. Baranenko V. I., Gulina O. M., Sal'nikov N. L. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika* [News universities. Nuclear power]. 2017, no. 4, pp. 83–93. [In Russian]
9. Antonov A. V., Ostreykovskiy V. A. *Resurs i srok sluzhby oborudovaniya energoblokov atomnykh stantsiy (na primere energoblokov Smolenskoy AES)* [Resource and service life of nuclear power plant units equipment (on the example of Smolensk NPP units)]. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2017, 536 p. [In Russian]
10. Mustafin F. M., Bykov L. I., Gumerov A. M., Vasil'ev G. G., Prokhorov A. D., Kvyatkovskiy O. P., Gamburg I. Sh., Spektor Yu. I. *Promyslovye truboprovody i oborudovanie: ucheb. posobie dlya vuzov* [Field pipelines and equipment : studies. textbook for universities]. Moscow: Nedra, 2004, 662 p. [In Russian]
11. OST 153.39.4.010–2002. *Metodika opredeleniya ostatochnogo resursa neftegazopromyslovykh truboprovodov* [OST 153.39.4.010–2002. Methods of determining the residual life of oil and gas field pipelines]. Moscow: Izd-vo UGNTU, 2002, 57 p. [In Russian]
12. Prigozhin I. *Ot sushchestvuyushchego k voznikayushchemu. Vremya i slozhnost' v fizicheskikh naukakh: per. s angl.* [From existing to arising. Time and complexity in the physical sciences: translation from english]. 2nd ed. suppl. Moscow: Editorial URSS, 2002, 288 p. [In Russian]
13. Prigozhin I. R. *Konets opredelennosti. Vremya. Khaos i novye zakony prirody* [End of certainty. Time. Chaos and new laws of nature]. Izhevsk: Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika, 2000, 208 p. [In Russian]
14. Belov S. V. *Priroda Rossii* [Nature of Russia]. Availale at: http://www.priroda.ru/ reviews/detail.php?ID = 11383 [In Russian]
15. Lyapunov A. M. *Sobranie sochineniy* [Collected works]. Moscow; Leningrad, 1956, vol. 2, 263 p. [In Russian]
16. Khaken G. *Sinergetika. Ierarkhiya neustoychivostey v samoorganizuyushchikhsya sistemakh i ustroystvakh* [Synergetics. Hierarchy of instabilities in self-organizing systems and devices]. Moscow: Mir, 1985, 415 p. [In Russian]
17. Ostreikovsky V. A., Shevchenko E. N., Yurkov N. K., Kochegarov I. I., Grishko A. K. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 944, iss. 1, pp. 1–10. DOI 10.1088/1742-6596/944/1/012085/
18. Grigorev A., Lysenko A., Kochegarov I., Roganov V., Lavendels J. *Applied computer systems*. Vol. 23, no. 2, pp. 150–160. DOI: 10.2478/acss-2018-0019.

Острейковский Владислав Алексеевич
доктор технических наук, профессор,
кафедра информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(628412, Россия, г. Сургут, ул. Ленина, 1)
E-mail: ova@ivi.surgu.ru

Лысенкова Светлана Александровна
кандидат физико-математических наук, доцент,
кафедра информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(628412, Россия, г. Сургут, ул. Ленина, 1)
E-mail: lsa1108@mail.ru

Ostreykovsky Vladislav Alekseevich
doctor of technical sciences, professor,
sub-department of informatics and computer science,
Surgut State University
(628412, 1 Lenin street, Surgut, Russia)

Lysenkova Svetlana Aleksandrovna
candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor,
sub-department of informatics and computer science,
Surgut State University
(628412, 1 Lenin street, Surgut, Russia)

Шевченко Елена Николаевна
кандидат физико-математических наук, доцент,
кафедра информатики и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(628412, Россия, г. Сургут, ул. Ленина, 1)
E-mail: elenan_27@mail.ru

Shevchenko Elena Nikolaevna
candidate of physical and mathematical sciences,
associate professor,
sub-department of informatics and computer science,
Surgut State University
(628412, 1 Lenin street, Surgut, Russia)

УДК 519.2:621.039:1 + 517.98
Острейковский, В. А.
О возможности использования эффекта асимметрии времени в задачах оценки долговечности сложных технических систем / В. А. Острейковский, С. А. Лысенкова, Е. Н. Шевченко // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 1 (25). – С. 21–34. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-3.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

TECHNOLOGICAL BASES OF IMPROVING THE RELIABILITY AND QUALITY OF PRODUCTS

УДК 621.382.029.6 **DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-4**

Б. П. Зеленцов, А. С. Трофимов

ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ РАСЧЕТА НАДЕЖНОСТИ ПРИ РАЗНЫХ СПОСОБАХ ЗАДАНИЯ ПЕРИОДИЧНОСТИ ПРОВЕРОК

B. P. Zelentsov, A. S. Trofimov

RESEARCH MODELS OF RELIABILITY CALCULATION WITH DIFFERENT WAYS OF TASK THE PERIODIC INSPECTION

Аннотация. Приведена аналитическая модель функционирования одиночного объекта в условиях контроля технического состояния. Рассмотрены три варианта модели: один вариант при постоянном периоде между проверками и два варианта при случайном периоде между проверками. Проведено сравнение этих вариантов и сделаны соответствующие выводы о влиянии характера периодического контроля и вида модели на уровень надежности объекта.

Ключевые слова: периодический контроль состояния, постоянный период контроля, случайный период контроля.

Abstract. An analytical model of the functioning of a single object in terms of monitoring the technical condition is given. Three variants of the model are considered: one variant with a constant period between checks and two variants with a random period between checks. A comparison of these options has been made and appropriate conclusions have been made on the influence of the nature of the periodic control and the type of model on the level of reliability of the object.

Keywords: periodical condition inspection, constant period of inspection, random period of inspection.

Введение

Для обеспечения необходимого уровня надежности производится контроль состояния, под которым понимают операции, выполняемые автоматически или вручную с целью определения и квалификации состояния объекта [1, 2].

В настоящей статье рассматривается функционирование некоторого объекта в условиях периодического контроля технического состояния путем проведения проверок. Такой контроль проводится во многих областях деятельности. В качестве примеров можно привести проведение проверок

© Зеленцов Б. П., Трофимов А. С., 2019

в следующих областях: различные виды медицинского диагностирования, функционирование электронного оборудования, программное обеспечение компьютеров, металлодетекторы, досмотр пассажиров и багажа, биометрическое сканирование, радиолокация, системы противопожарной безопасности, электрические сети, автоматика энергетических систем, станции и подстанции и др.

Целью статьи является исследование влияния способа задания периодичности проверок и вида модели на надежность объекта. Проверки технического состояния объекта могут производиться с постоянным, заранее установленным периодом или со случайным периодом. Периодический контроль со случайным периодом зачастую принимается распределенным по показательному закону, в результате обнаружение отказа задерживается на случайное время, распределенное по показательному закону. Использование показательного распределения существенно упрощает математическую модель, однако при этом имеет место такой уровень надежности, который может отличаться от уровня надежности при постоянном периоде. Следует отметить, что данный подход в задании периодической проверки широко используется специалистами для определения показателей надежности технических систем [4–7].

С целью оценки степени влияния способа задания периодической проверки на показатели надежности технических систем предложены три модели:

1) периодический контроль с постоянным периодом;
2) периодический контроль со случайным периодом с отсчетом времени от предыдущей проверки;
3) периодический контроль со случайным периодом с отсчетом времени от отказа объекта.

Функционирование объекта

Объект используется по назначению и периодически подвергается проверкам. Между проверками может произойти отказ объекта, в результате чего он переходит из работоспособного состояния в неработоспособное. Объект используется по назначению как в работоспособном, так и в неработоспособном состоянии. Если проверке подвергается работоспособный объект, то после проверки он возвращается на функционирование. Если же проверяется неработоспособный объект, то он направляется на восстановление, после которого возвращается на функционирование в работоспособном состоянии.

Будем называть периодом интервал времени между двумя последовательными проверками или между восстановлением и проверкой, в течение которого объект используется по назначению. Этот интервал может быть постоянным, заранее установленным, или случайным. Целесообразно выделить периоды двух типов: периоды без отказа (отказ в течение периода не происходит) и периоды с отказом (в течение этого периода происходит отказ). Продолжительность постоянного периода или распределение времени случайного периода не зависят от типа периода. После периода с отказом объект направляется на восстановление.

Эксплуатацию объекта во времени можно представить в виде циклов. Цикл эксплуатации объекта состоит в его использовании по назначению совместно с проверками и следующее за этим восстановление. Отказ объекта происходит на последнем периоде каждого цикла, так как после отказа объект направляется на восстановление. Следует отметить, что число периодов без отказа на одном цикле является случайным, а период с отказом всегда один на каждом цикле.

Рассмотрим периодический контроль с постоянным периодом.

Периодический контроль с постоянным периодом

Проверки проводятся с постоянным периодом T, который устанавливается после восстановления или после очередной проверки работоспособного объекта. Таким образом, постоянный интервал проверок устанавливается после каждого вхождения в работоспособное состояние. Диаграмма состояний объекта приведена на рис. 1.

На периоде с отказом происходит переход в состояние 2 с интенсивностью λ, при этом объект остается в состоянии 2 до проведения очередной проверки, после которой имеет место восстановление. Таким образом, переходы между состояниями $1 \to 2 \to 4$ происходят на одном периоде, который является последним периодом цикла. Этот период изображен на диаграмме пунктирной линией.

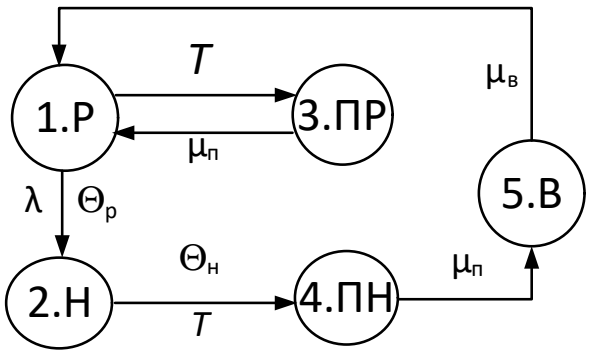


Рис. 1. Диаграмма состояний объекта: Р – работоспособное состояние; Н – неработоспособное состояние; ПР – проверка работоспособного объекта; ПН – проверка неработоспособного объекта; В – восстановление объекта; T – постоянный период между проверками; $\mu_в$ – интенсивность завершения восстановления; $\mu_п$ – интенсивность завершения проверки

В дальнейшем принято, что продолжительность проверки и продолжительность восстановления являются пренебрежимо малыми по сравнению с продолжительностями состояний 1 и 2, поэтому принято, что $\mu_п = \infty$, $\mu_в = \infty$.

На интервале времени [0; T] объект может находиться только в состояниях 1 или 2. Переход в состояние очередной проверки может произойти в момент времени $t = T$, отсчитываемый от предыдущей проверки. Если на интервале [0; T] отказ не происходит, то в момент времени $t = T$ происходит переход в состояние 3. Если же на интервале [0; T] наступает отказ, то после этого объект остается в состоянии 2 и затем в момент времени $t = T$ переходит в состояние 4. Следует отметить, что как при отсутствии отказа, так и при наступлении отказа на периоде состояние 1 является начальным при $t = 0$.

Возможны следующие переходы между состояниями на интервале [0; T]:

1) если на этом интервале отказ не произойдет, то в конце интервала при $t = T$ производится проверка работоспособного объекта (переход 1 → 3);

2) если на интервале произойдет отказ, то в конце интервала при $t = T$ производится проверка неработоспособного объекта (переход 1 → 4).

Дифференциальные уравнения равновесия на интервале [0; T]:

$$p'_1(t) = -\lambda p_1(t);\ p'_2(t) = \lambda p_1(t). \tag{1}$$

Решение этих уравнений при начальных условиях $p_1(0) = 1$, $p_2(0) = 0$ имеет вид

$$p_1(t) = e^{-\lambda t};\ p_2(t) = 1 - e^{-\lambda t}. \tag{2}$$

Итак, на очередную проверку объект попадает в момент времени $t = T$, отсчитываемый от завершения восстановления или от завершения очередной проверки. Вероятности этих переходов названы вероятностями прохождений полумарковского процесса [3]. Таким образом, вероятности прохождений – это вероятности попадания в состояния проверки в конце периода:

$$p_{13} = p_1(T) = e^{-\lambda T};\ p_{14} = p_2(T) = 1 - e^{-\lambda T}. \tag{3}$$

Вероятности прохождений на множестве состояний удобно записывать в виде матрицы P:

$$P = \left\| p_{ij} \right\| = \begin{pmatrix} 0 & 0 & e^{-\lambda T} & 1-e^{-\lambda T} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \tag{4}$$

где p_{ij} – условная вероятность непосредственного перехода из i-го состояния в j-е состояние при условии, что i-е состояние меняется. Вероятности прохождений описывают процесс в момент пере-

мены состояния, поэтому $p_{ii} = 0$ для всех i. Вероятности p_{ij} называют еще переходными вероятностями вложенной цепи.

В соответствии с представлением процесса эксплуатации объекта в идее циклов множество состояний разбивается на два подмножества: $U = \{1, 2, 3, 4\}$; $V = \{5\}$. Таким образом, цикл эксплуатации объекта заключается в нахождении в подмножестве U и следующее за ним нахождение в подмножестве V. Другими словами: цикл эксплуатации состоит из нескольких периодов между двумя восстановлениями и самого восстановления.

На подмножестве U матрицу вероятностей прохождений P_{UU} получают путем вычеркивания строк и столбцов, соответствующих состояниям подмножества V:

$$P_{UU} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & e^{-\lambda T} & -e^{-\lambda T} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \tag{5}$$

Для расчета надежности в статье рассмотрены характеристики состояний 1 и 2 как на отдельных периодах, так и на цикле. При этом начало любого периода отсчитывается от состояния 1.

По матрице P_{UU} находится матрица относительных частот подмножества U [3]:

$$N_U = \|n_U(i,j)\| = (E - P_{UU})^{-1} = \begin{pmatrix} 1/(1-e^{-\lambda T}) & 0 & e^{-\lambda T}/(1-e^{-\lambda T}) & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1/(1-e^{-\lambda T}) & 0 & 1/(1-e^{-\lambda T}) & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \tag{6}$$

где $n_U(i,j)$ – средняя относительная частота j-го состояния, определяемая как среднее число попаданий (вхождений) в j-е состояние до выхода из подмножества U при условии, что i-е состояние является начальным при вхождении в подмножество U; E – единичная матрица.

Поскольку состояние 1 всегда является начальным при переходе $V \to U$, то средние относительные частоты состояний можно представить одной строкой, которая является первой строкой матрицы N_U:

$$\overline{n}_U = \|n_U(1,j)\| = \left\| 1/(1-e^{-\lambda T}) \quad 0 \quad e^{-\lambda T}/(1-e^{-\lambda T}) \quad 1 \right\|. \tag{7}$$

Выразим средние относительные частоты состояний через исходные параметры:

$$n_U(1,1) = \frac{1}{1-e^{-\lambda T}};\ n_U(1,3) = \frac{e^{-\lambda T}}{1-e^{-\lambda T}};\ n_U(1,4) = 1. \tag{8}$$

Для лучшего понимания полученного результата отметим следующее:

а) на одном цикле имеет место одно попадание в состояние 4;

б) среднее число попаданий в состояние 1 всегда больше числа проверок работоспособного объекта на одну проверку;

в) среднее число периодов, на которых объект является работоспособным, равно $n_U(1,3)$;

г) один цикл эксплуатации объекта содержит в среднем $n_U(1,1)$ периодов;

д) отказ объекта обнаруживается системой контроля на последнем периоде.

Время нахождения в состоянии 1 на одном цикле состоит из $n_U(1,3)$ полных периодов с продолжительностью T плюс время нахождения в этом состоянии на последнем периоде. На последнем периоде среднее время нахождения в состояниях 1 и 2, соответственно $\theta_р$ и $\theta_н$, определяется интегрированием вероятностей состояний 1 и 2 на регулярном периоде:

$$\theta_р = \int_0^T p_1(t)\mathrm{d}t = \frac{1-e^{-\lambda T}}{\lambda};\ \theta_н = \int_0^T p_2(t)\mathrm{d}t = \frac{\lambda T - (1-e^{-\lambda T})}{\lambda}. \tag{9}$$

Видно, что $\theta_р + \theta_н = T$.

Среднее время нахождения в работоспособном и неработоспособном состояниях на одном цикле определяется относительной частотой этих состояний и временами $\theta_р$ и $\theta_н$:

$$t_р = T \cdot n_U(1,3) + \theta_р = \frac{\lambda T e^{-\lambda T} + (1-e^{-\lambda T})^2}{\lambda(1-e^{-\lambda T})};\ t_н = \theta_н = \frac{\lambda T - \left(1-e^{-\lambda T}\right)}{\lambda}, \tag{10}$$

где t_p – среднее время нахождения в состоянии 1 на одном цикле при условии, что состояние 1 является начальным состоянием цикла; $t_н$ – среднее время нахождения в состоянии 2 на одном цикле при условии, что состояние 1 является начальным состоянием цикла.

Среднее время одного цикла или среднее время нахождения в подмножестве U находится путем суммирования этих времен

$$t_ц = t_р + t_н = \frac{T}{1-e^{-\lambda T}}. \tag{11}$$

В соответствии с [1] при расчете коэффициентов готовности и неготовности могут исключаться планируемые периоды, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается. Будем относить периодические проверки и восстановление к периодам, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается. Тогда стационарные коэффициенты готовности и неготовности при исключенных проверках и восстановлении вычисляются по формулам

$$K_г = \frac{t_р}{t_ц} = \frac{\lambda T e^{-\lambda T} + (1-e^{-\lambda T})^2}{\lambda T};\ K_н = \frac{t_н}{t_ц} = \frac{[\lambda T - (1-e^{-\lambda T})](1-e^{-\lambda T})}{\lambda T}. \tag{12}$$

З а м е ч а н и е. При необходимости может быть вычислен также коэффициент технического использования, в котором учитывается время простоев, обусловленных проверками и восстановлением объекта [1].

Периодический контроль со случайным периодом с отсчетом времени от предыдущей проверки

Отличительная особенность этого варианта заключается в том, что время до очередной проверки распределено по показательному закону с интенсивностью γ. Таким образом, переходы между состояниями происходят в непрерывном времени с постоянными интенсивностями. На одном периоде время отсчитывается от состояния 1. Период может протекать теоретически на интервале $[0; \infty)$.

Диаграмма состояний объекта приведена на рис. 2. Переход между состояниями $1 \to 4$ происходит с интенсивностью γ, однако на этом периоде интервала с отказом имеет место переход $1 \to 2 \to 4$. Период с отказом показан на диаграмме пунктирной линией.

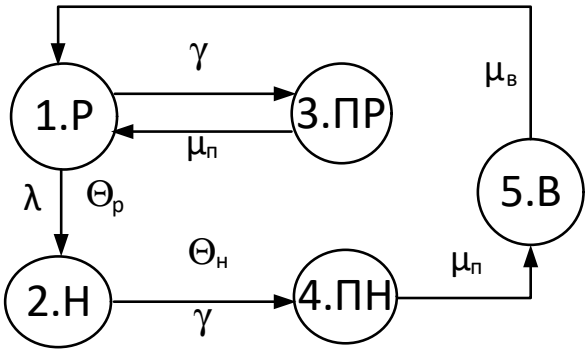


Рис. 2. Диаграмма состояний объекта

Система дифференциальных уравнений равновесия на одном периоде:

$$p'_1(t) = -(\lambda + \gamma)p_1(t);\ p'_2(t) = \lambda p_1(t) - \gamma p_2(t);\ p'_3(t) = \gamma p_1(t);\ p'_4(t) = \gamma p_2(t). \tag{13}$$

Решение этой системы уравнений при начальных условиях $p_1(0) = 1$:

$$\left.\begin{aligned} &p_1(t) = e^{-(\lambda+\gamma)t};\ p_2(t) = (1-e^{-\lambda t})e^{-\gamma t};\\ &p_3(t) = \frac{\gamma[1-e^{-(\lambda+\gamma)t}]}{\lambda+\gamma};\ p_4(t) = \frac{\lambda+\gamma e^{-(\lambda+\gamma)t}-(\lambda+\gamma)e^{-\gamma t}}{\lambda+\gamma}\ . \end{aligned}\right\} \tag{14}$$

Очевидно, что сумма вероятностей $p_1(t)+p_2(t)+p_3(t)+p_4(t)=1$.

Вероятности прохождений, или вероятности переходов 1 → 3 и 1 → 4, принимают значения соответствующих вероятностей на интервале [0; ∞):

$$p_{13} = p_3(\infty) = \frac{\gamma}{\lambda+\gamma};\ p_{14} = p_4(\infty) = \frac{\lambda}{\lambda+\gamma}. \tag{15}$$

Таким образом, вероятности попадания в состояния 3 и 4 на одном периоде пропорциональны интенсивностям переходов 1 → 3 и 1 → 2.

Матрица P вероятностей прохождений на множестве состояний и матрица P_{UU} вероятностей прохождений на подмножестве U имеют вид

$$P = \|p_{ij}\| = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \gamma/(\lambda+\gamma) & \lambda/(\lambda+\gamma) & 0\\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1\\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};\ P_{UU} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \gamma/(\lambda+\gamma) & \lambda/(\lambda+\gamma)\\ 0 & 0 & 0 & 1\\ 1 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \tag{16}$$

Представим первую строку матрицы относительных частот состояний, вычисляемой по формуле $N_U = (E - P_{UU})^{-1}$:

$$\overline{n}_U = \|n_U(1,j)\| = \left\|\frac{\lambda+\gamma}{\lambda} \quad 0 \quad \frac{\gamma}{\lambda} \quad 1\right\|. \tag{17}$$

Средние относительные частоты состояний вычисляются по формулам

$$n_U(1,1) = \frac{\lambda+\gamma}{\lambda};\ n_U(1,3) = \frac{\gamma}{\lambda};\ n_U(1,4) = 1. \tag{18}$$

Видно, что $n_U(1,3)+n_U(1,4) = n_U(1,1)$, т.е. на одном цикле всегда одно попадание в состояние 4, а среднее число попаданий в состояние 3 меньше среднего числа попаданий в состояние 1 на одно попадание.

Перейдем к временам нахождения в состояниях на одном периоде.

Среднее время периода с отказом, также равного $1/\gamma$, состоит из двух частей: среднего времени $\theta_р$ нахождения в состоянии 1 и среднего времени $\theta_н$ нахождения в состоянии 2. Эти средние времена определяются вероятностями нахождения в состояниях 1 и 2 на последнем периоде:

$$\theta_р = \int_0^\infty p_1(t)\mathrm{d}t = \frac{1}{\lambda+\gamma};\ \theta_н = \int_0^\infty p_2(t)\mathrm{d}t = \frac{\lambda}{(\lambda+\gamma)\gamma}. \tag{19}$$

Видно, что $\theta_р + \theta_н = 1/\gamma$, то есть сумма средних времен состояний 1 и 2 на последнем периоде равна среднему периоду, который не зависит от того, наступил или не наступил отказ.

Средние времена нахождения в состояниях 1 и 2 на одном цикле, соответственно $t_р$ и $t_н$, вычисляются по формулам

$$t_р = n_U(1,3)/\gamma + \theta_р = \frac{2\lambda+\gamma}{\lambda(\lambda+\gamma)};\ t_н = \theta_н = \frac{\lambda}{(\lambda+\gamma)\gamma}. \tag{20}$$

Среднее время цикла

$$t_ц = t_р + t_н = \frac{\lambda+\gamma}{\lambda\gamma}. \tag{21}$$

Коэффициенты готовности и неготовности:

$$K_{\text{г}} = \frac{t_{\text{р}}}{t_{\text{ц}}} = \frac{(2\lambda+\gamma)\gamma}{(\lambda+\gamma)^2}; \; K_{\text{н}} = \frac{t_{\text{н}}}{t_{\text{ц}}} = \frac{\lambda^2}{(\lambda+\gamma)^2}. \tag{22}$$

З а м е ч а н и е. Среднее время цикла может быть получено также с учетом того, что продолжительность периода не зависит от того, наступил или не наступил отказ:

$$t_{\text{ц}} = n_U(1,1)(1/\gamma) = \frac{\lambda+\gamma}{\lambda\gamma}, \tag{23}$$

где $1/\gamma$ – средняя продолжительность между проверками.

Периодический контроль со случайным периодом с отсчетом времени от отказа объекта

После попадания в каждое состояние время нахождения в нем является случайным и распределено по показательному закону. Поэтому переходы между состояниями характеризуются постоянными интенсивностями. Переходы между состояниями могут произойти в произвольный момент времени теоретически на интервале (0; ∞), который отсчитывается от начала попадания в каждое состояние. Такой процесс является однородным марковским процессом в непрерывном времени [3]. Диаграмма состояний такого процесса приведена на рис. 3.

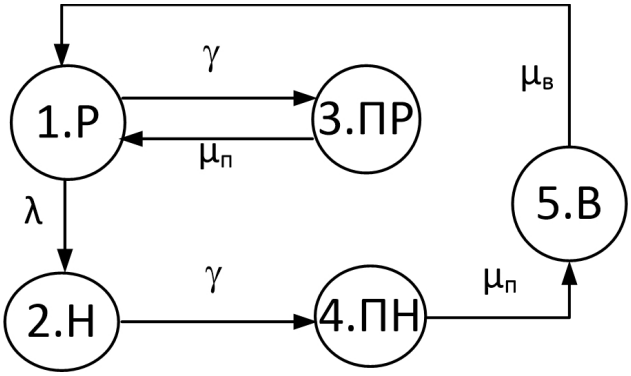


Рис. 3. Диаграмма состояний объекта

Система дифференциальных уравнений равновесия на одном периоде:

$$p'_1(t) = -(\lambda+\gamma)p_1(t); \; p'_2(t) = \lambda p_1(t); \; p'_3(t) = \gamma p_1(t). \tag{24}$$

Решение этой системы уравнений при начальных условиях $p_1(0) = 1$:

$$p_1(t) = e^{-(\lambda+\gamma)t}; \; p_2(t) = \frac{\lambda}{\lambda+\gamma}(1-e^{-(\lambda+\gamma)t}); \; p_3(t) = \frac{\gamma}{\lambda+\gamma}(1-e^{-(\lambda+\gamma)t}). \tag{25}$$

Сумма вероятностей $p_1(t)+p_2(t)+p_3(t)=1$.

Вероятности прохождений из состояния 1 имеют вид

$$p_{13} = p_3(\infty) = \frac{\gamma}{\lambda+\gamma}; \; p_{12} = p_2(\infty) = \frac{\lambda}{\lambda+\gamma}. \tag{26}$$

Матрица P вероятностей прохождений на множестве состояний и матрица P_{UU} вероятностей прохождений на подмножестве U имеют вид

$$P = \|p_{ij}\| = \begin{pmatrix} 0 & \lambda/(\lambda+\gamma) & \gamma/(\lambda+\gamma) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; \; P_{UU} = \begin{pmatrix} 0 & \lambda/(\lambda+\gamma) & \gamma/(\lambda+\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \tag{27}$$

Как и ранее, матрица относительных частот состояний подмножества U вычисляется по формуле $N_U = (E - P_{UU})^{-1}$. Первая строка этой матрицы

$$\overline{n}_U = \|n_U(1,j)\| = \left\| \frac{\lambda+\gamma}{\lambda} \quad 1 \quad \frac{\gamma}{\lambda} \quad 1 \right\|. \tag{28}$$

Средние времена нахождения в состояниях 1 и 2 на одном цикле, а также среднее время цикла вычисляются по формулам

$$t_{\text{р}}(1) = n_U(1,1)/(\lambda+\gamma) = 1/\lambda;\ t_{\text{н}} = n_U(1,2)/\gamma = 1/\gamma;\ t_{\text{ц}} = t_{\text{р}} + t_{\text{н}} = (\lambda+\gamma)/(\lambda\gamma). \tag{29}$$

Коэффициенты готовности и неготовности:

$$K_{\text{г}} = \frac{t_{\text{р}}}{t_{\text{ц}}} = \frac{\gamma}{\lambda+\gamma};\ K_{\text{н}} = \frac{t_{\text{н}}}{t_{\text{ц}}} = \frac{\lambda}{\lambda+\gamma}. \tag{30}$$

Видно, что $K_{\text{г}} + K_{\text{н}} = 1$.

Сравнение моделей расчета надежности

Для сравнения способов задания периодичности проверок введем параметр ρ, который назовем приведенной интенсивностью отказов объекта: $\rho = \lambda T$ для периодического контроля с постоянным периодом и $\rho = \lambda/\gamma$ для периодического контроля со случайным периодом. Смысл этого параметра заключается в следующем: для периодического контроля с постоянным периодом – это среднее число отказов объекта за постоянный период, а для периодического контроля со случайным периодом – это среднее число отказов объекта за среднее время между проверками. Поэтому можно считать, что сравнение способов задания периодичности проверок происходит по параметру ρ. При одной и той же интенсивности отказов и при равенстве параметров ρ сравнение происходит при условии, что постоянный период равен среднему времени между проверками: $T = 1/\gamma$. Показатели надежности, выраженные через параметра ρ, приведены в табл. 1, а значения коэффициента неготовности в зависимости от значения параметра ρ – в табл. 2.

Таблица 1

Формулы для вычисления показателей надежности с помощью параметра ρ

Показатель	Проверки с постоянным периодом ($\rho = \lambda \cdot T$)	Проверки со случайным периодом ($\rho = \lambda/\gamma$) с отсчетом времени от	
		предыдущей проверки	отказа объекта
Коэффициент готовности $K_{\text{г}}$	$\frac{\rho \cdot e^{-\rho} + (1-e^{-\rho})^2}{\rho}$	$\frac{1+2\rho}{(1+\rho)^2}$	$\frac{1}{1+\rho}$
Коэффициент неготовности $K_{\text{н}}$	$\frac{[\rho-(1-e^{-\rho})](1-e^{-\rho})}{\rho}$	$\frac{\rho^2}{(1+\rho)^2}$	$\frac{\rho}{1+\rho}$

Таблица 2

Значения коэффициента неготовности при разных значениях параметра ρ

ρ	Проверки с постоянным периодом	Проверки со случайным периодом с отсчетом времени от	
		предыдущей проверки	отказа объекта
1	0,23	0,25	0,5
10^{-1}	$0{,}5 \cdot 10^{-2}$	$0{,}8 \cdot 10^{-2}$	$0{,}9 \cdot 10^{-1}$
10^{-2}	$0{,}5 \cdot 10^{-4}$	10^{-4}	10^{-2}
10^{-3}	$0{,}5 \cdot 10^{-6}$	10^{-6}	10^{-3}
10^{-4}	$0{,}5 \cdot 10^{-8}$	10^{-8}	10^{-4}

На рис. 4 приведены графики зависимости коэффициента неготовности от параметра ρ.

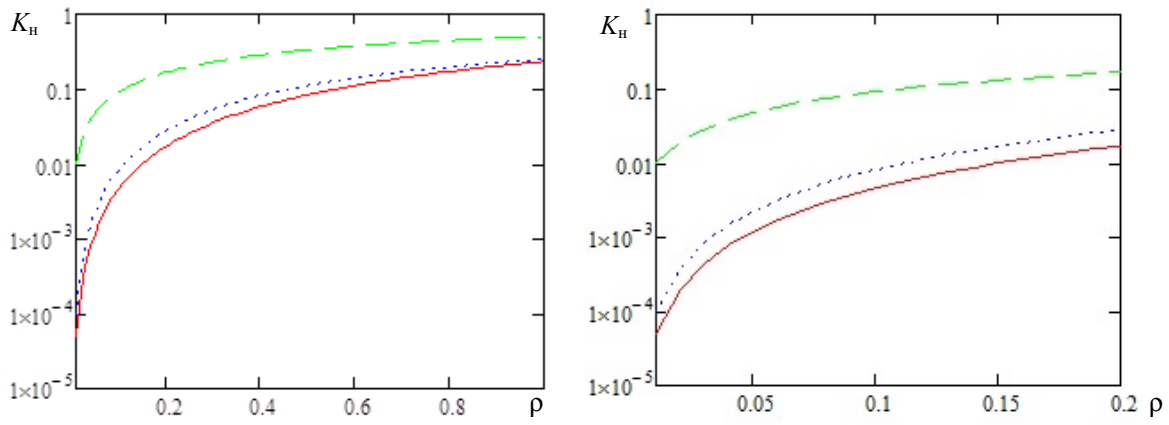


Рис.4. График зависимости коэффициента неготовности от параметра ρ:
..... – проверки с постоянным периодом и со случайным периодом с отсчетом времени от предыдущей проверки; - - - - - – проверки со случайным периодом с отсчетом времени от отказа объекта; ——— – проверки с постоянным периодом

Из приведенных результатов следует, что при случайном периоде контроля состояния коэффициент неготовности отличается от коэффициента неготовности при постоянном периоде контроля состояния.

Значения коэффициента неготовности при постоянном периоде и при случайном периоде контроля состояния с отсчетом времени от предыдущей проверки практически совпадают. Однако между этими значениями и значениями при случайном периоде с отсчетом времени от отказа объекта различие существенное, порядок этого различия сопоставим с порядком параметра ρ.

Значение параметра ρ показывает одновременно насколько надежна техническая система и значение при этом периода между проверками. При малых значениях ρ, близких к нулю, техническая система имеет высокую надежность и часто проверяется. При таком соотношении надежности и уровня периодических проверок существует большое количество интервалов проверок, на котором не происходит ни одного отказа технической системы. На рис. 4 видно, что при приближении ρ к нулю увеличивается разница между коэффициентами неготовности в зависимости от способа задания периодической проверки. Это говорит о том, что при втором способе задания периодической проверки не учитывается время функционирования технической системы в состоянии без отказов. Данный факт приводит к завышению значения коэффициента неготовности, что равнозначно снижению уровня надежности такой технической системы.

Заключение

Приведен метод и получены формулы для расчета показателей надежности и некоторых эксплуатационных показателей для случаев, когда проверки проводятся с постоянным периодом для двух случаев, и в случае когда проверки задаются случайным периодом. Из проведенного исследования видно, что эти показатели зависят как от интенсивности отказов, так и от параметров периодичности проверок.

Показана целесообразность сравнения показателей надежности по приведенной интенсивности отказов, которой придается один и тот же смысл как для контроля с постоянным периодом, так и со случайным периодом.

В известных публикациях использована марковская модель переходов между состояниями, в которой попадание в неработоспособное состояние происходит на последнем периоде в начальный момент этого периода. В результате среднее время неработоспособного состояния на одном цикле равно среднему времени одного периода. Такой подход может привести к большой погрешности при расчете показателей надежности. Считаем более правильным учитывать отказ объекта не в начале последнего периода, а в случайный момент времени на последнем периоде. При таком подходе случайный разброс времени между периодическими проверками приводит к существенному снижению уровня надежности.

Библиографический список

1. ГОСТ 27.002–2015. Надежность в технике. Термины и определения.
2. ГОСТ Р 53480–2009. Надежность в технике. Термины и определения.
3. *Зеленцов, Б. П.* Матричные методы моделирования однородных марковских процессов / Б. П. Зеленцов. – Palmarium Academic Publishing, 2017. – 133 с.
4. *Зеленцов, Б. П.* Модель функционирования системы релейной защиты при регулярных проверках / Б. П. Зеленцов, А. С. Трофимов // Вестник СибГУТИ. – 2017. – № 4. – С. 56–66.
5. Надежность технических систем : справочник / под ред. И. А. Ушакова. – Москва : Радио и связь, 1985. – 608 с.
6. *Рахман, П. А.* Показатели надежности восстанавливаемых систем с заданным порогом аварийного отключения / П. А. Рахман // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 9. – С. 467–470.
7. *Трофимов, А. С.* Модель функционирования релейной защиты энергосистем / А. С. Трофимов, Б. П. Зеленцов // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2016. – № 6. – С. 110–114.

References

1. GOST 27.002-2015. *Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya* [GOST 27.002-2015. Reliability in technology. Terms and definitions]. [In Russian]
2. GOST R 53480-2009. *Nadezhnost' v tekhnike. Terminy i opredeleniya* [GOST R 53480-2009. Reliability in technology. Terms and definitions]. [In Russian]
3. Zelentsov B. P. *Matrichnye metody modelirovaniya odnorodnykh markovskikh protsessov* [Matrix methods for modeling homogeneous Markov processes]. Palmarium Academic Publishing, 2017, 133 p. [In Russian]
4. Zelentsov B. P., Trofimov A. S. *Vestnik SibGUTI* [Vestnik SibSUTI]. 2017, no. 4, pp. 56–66. [In Russian]
5. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem: spravochnik* [Reliability of technical systems : Handbook]. Ed. by I. A. Ushakov. Moscow: Radio i svyaz', 1985, 608 p. [In Russian]
6. Rakhman P. A. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International journal of applied and fundamental research]. 2015, no. 9, pp. 467–470. [In Russian]
7. Trofimov A. S., Zelentsov B. P. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie* [Electricity. Transmission and distribution]. 2016, no. 6, pp. 110–114. [In Russian]

Зеленцов Борис Павлович
доктор технических наук, профессор,
трижды Соросовский профессор,
Сибирский государственный университет
телекоммуникаций и информатики
(630000, Россия, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86)
E-mail: zelentsovb@mail.ru

Трофимов Андрей Сергеевич
кандидат технических наук, доцент,
кафедра электрических станций,
Новосибирский государственный
технический университет
(630073, Россия, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20)
E-mail: as.trofimov@gmail.com

Zelentsov Boris Pavlovich
doctor of technical sciences, professor,
thrice soros professor,
Siberian State University
of Telecommunications and Informatics
(630000, 86 Kirova street, Novosibirsk, Russia)

Trofimov Andrey Sergeevich
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of power stations,
Novosibirsk State Technical University
(630073, 20 K. Marks avenue, Novosibirsk,
Moscow, Russia)

УДК 621.382.029.6

Зеленцов, Б. П.

Исследование моделей расчета надежности при разных способах задания периодичности проверок / Б. П. Зеленцов, А. С. Трофимов // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 1 (25). – С. 35–44. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-4.

УДК 004.932.2 DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-5

А. В. Григорьев, И. И. Кочегаров, А. В. Лысенко, А. С. Подсякин, Н. К. Юрков

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗМЕРЕНИЯ АППЛИКАТЫ ВИБРАЦИОННОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАЗМЫТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ КРУГЛОЙ МЕТКИ[1]

A. V. Grigorev, I. I. Kochegarov, A. V. Lysenko, A. S. Podsyakin, N. K. Yurkov

MEASUREMENT TECHNOLOGY APPLICATI VIBRATION DISPLACEMENTS BASED ON THE ANALYSIS OF DEFOCUS OF THE IMAGE OF A CIRCULAR MARK

Аннотация. *Актуальность и цели.* Объектом исследования является технология измерения величины и направления вектора амплитуды вибрационного перемещения исследуемой материальной точки, в основу которой положен сравнительный анализ изображений матрицы меток круглой формы, одно из которых получено при отсутствии вибрации, а другое – при ее наличии. Целью работы является формирование основных принципов оценки погрешности представленной измерительной технологии. *Материалы и методы*. Применен метод графического моделирования изображения круглой метки, обосновано научное положение первичной обработки измерительного сигнала, получаемого от вибрационного перемещения исследуемой материальной точки. Для описания концепции оценки погрешности предлагаемой измерительной технологии применены методы графического и численного моделирования и вероятностного прогнозирования. *Результаты*. Предложена адекватная математическая модель процессов формирования и преобразования изображения круглой метки при ее вибрационном перемещении по аппликате. Сформированы основные соотношения для вычисления амплитуды вибрационного перемещения исследуемой материальной точки по аппликате. Выработана концепция оценки погрешности технологии измерения амплитуды вибрационного перемещения исследуемой точки поверхности объекта контроля по аппликате на основе анализа размытия изображения круглой метки. *Выводы*. Предложенная математическая модель процессов формирования и преобразования изображения круглой метки при ее вибрационном перемещении по аппликате позволяет идентифицировать приращение

Abstract. *Background*. The object of the study is the technology of measuring the magnitude and direction of the amplitude vector of the vibration movement of the material point under study, which is based on a comparative analysis of images of a matrix of round-shaped marks, one of which is obtained in the absence of vibration, and the other in its presence. The aim of the work is to form the basic principles of error estimation of the presented measuring technology. *Materials and methods*. The method of graphic modeling of the image of a round mark is applied, the scientific position of primary processing of the measuring signal received from vibration movement of the investigated material point is proved. Methods of graphical and numerical modeling and probabilistic forecasting are used to describe the concept of error estimation of the proposed measurement technology. *Results*. An adequate mathematical model of the processes of formation and transformation of the image of a round mark during its vibration movement on the applicate is proposed. The basic relations for calculating the amplitude of the vibration movement of the studied material point along the applicate are formed. The concept of estimating the error of the technology of measuring the amplitude of the vibration movement of the investigated point of the surface of the control object on the application based on the analysis of the image blur of the round mark. *Conclusions*. The proposed mathematical model of the processes of formation and transformation of the image of a round mark during its vibration movement on the application allows to identify the increment of the radius of the image of a round mark during its vibration blur as a measuring signal, on the basis of which the amplitude of the vibration movement that caused it can be calculated. Formed basic relationships allow to make such a calculation. The developed concept allows to estimate

[1] Статья подготовлена в рамках реализации проекта «Адаптивная интеллектуальная система вибрационных испытаний бортовой радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической и авиационной техники нового поколения на основе многофункциональной цифровой генерации испытательных сигналов» (Соглашение № 17-79-10281 от 24.07.2017) при финансовой поддержке Российского научного фонда.

© Григорьев А. В., Кочегаров И. И., Лысенко А. В., Подсякин А. С., Юрков Н. К., 2019

радиуса изображения круглой метки при его вибрационном размытии в качестве измерительного сигнала, на основе которого может быть вычислена амплитуда вызвавшего его вибрационного перемещения. Сформированные основные соотношения позволяют практически осуществить такое вычисление. Выработанная концепция позволяет оценить погрешность измерения амплитуды вибрационного перемещения на основе известной погрешности измерения площади четкого изображения круглой метки на исходной позиции при отсутствии вибрации.

Ключевые слова: вибрация, модель, расфокусирование, изображение, дискретизация, погрешность, пиксель, матрица, контур, вектор, перемещение, бинаризация.

the measurement error of the vibration displacement amplitude based on the known measurement error of the area of a clear image of a round mark at the initial position in the absence of vibration.

Keywords: vibration, model, defocusing, images, sampling, error, pixel, matrix, contour, vector, displacement, binarization.

Введение

В процессе эксплуатации машин и механизмов, зданий и сооружений, радиоэлектронной аппаратуры и других технических объектов в них постепенно накапливаются усталостные разрушения, развиваются дефекты. Поэтому жизненно важно обнаружить дефект, пока он еще не развился, в его латентной фазе, когда он еще не только не приводит к отказу оборудования, но даже и не изменяет более или менее значимо его свойств [1]. Известно, что опытный тракторист может по звуку работающего двигателя уловить, что внутри этого двигателя что-то изменилось. А звук работающего двигателя – это и есть вибрации. Таким образом, параметры вибраций технических объектов несут информацию о состоянии этих объектов. Контроль состояния вибрационно нагруженных технических объектов может осуществляться на основе измерения параметров вибраций [2].

Современное состояние вопроса

Средства измерения параметров вибраций технических объектов, в основу которых положен анализ размытия изображения круглой метки, требуют предварительной калибровки [3]. Динамическая калибровочная характеристика виброметра, использующего размытие изображения круглой метки, была получена в статье [4]. Методологические основы оптического допускового контроля изображений объектов, применяемые в таких виброметрах, изложены в статье [5]. Методики обнаружения возмущений, соответствующих развивающимся дефектам контролируемых объектов, во многом аналогичны тем, что применяются при распознавании электронно-дифракционных рефлексов [6]. Первичная обработка исходного вибрационно размытого изображения во многом похожа на первичную обработку электронно-дифракционных поверхностей [7]. Обнаружение и идентификация скрытых дефектов контролируемых объектов на основе анализа четкого и размытого изображений круглой метки осуществляется аналогично обнаружению и идентификации латентных технологических дефектов проводящего рисунка печатных плат [8]. В основу предварительной обработки исходного полутонового размытого изображения круглой метки положен принцип негативно-контурной классификации растровых элементов [9]. В статье [10] приведено описание преобразования системой обработки нижнего контура склона электронно-дифракционного рефлекса. В статье [11] представлены характеристические признаки и логический функционал структурно-разностной сегментации полутонового изображения. Все это применяется при анализе вибрационно размытого изображения круглой метки или матрицы круглых меток для обнаружения скрытых дефектов технических объектов [12]. Анализ предельных ситуаций компланарного и ортогонального вибрационных перемещений изложен в [13]. Структура методики измерения параметров вибраций на основе анализа размытия изображения круглой метки представлена в [14]. В статье [15] приведено описание контактного оптического датчика давления, используемого при измерении интенсивности вибрационных воздействий.

Модель формирования и преобразования изображения круглой метки

При статическом приближении метки к регистрирующему устройству радиус ее изображения увеличивается. Это происходит за счет эффекта расфокусирования изображения. При статическом удалении метки от регистрирующего устройства радиус ее изображения за счет того же эффекта уменьшается.

В процессе вибрационного перемещения метка то приближается к регистрирующему устройству, то удаляется от него (рис. 1).

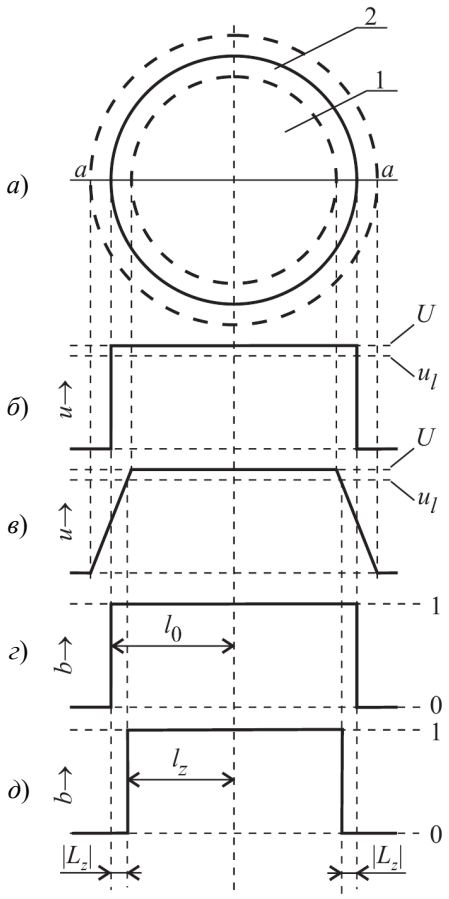


Рис. 1. Модель формирования и преобразования изображения метки

На рис. 1,*а* сплошной линией показан контур изображения метки на исходной позиции при отсутствии вибрации, а пунктирными линиями показаны контуры расфокусированных изображений метки в крайних положениях вибрационного перемещения.

На рис. 1,*б* показано распределение интенсивности регистрируемого излучения вдоль диаметрального сечения изображения метки *а-а* при отсутствии вибрации. Здесь u – текущее значение интенсивности регистрируемого излучения; U – максимальное значение интенсивности регистрируемого излучения u, соответствующее четкому изображению метки, предварительно полученному при отсутствии вибрации; u_l – порог бинаризации.

На рис. 1,*в* показано распределение интенсивности регистрируемого излучения вдоль диаметрального сечения изображения метки *а-а* при наличии вибрации.

На рис. 1,*г* показано распределение интенсивности бинарного изображения метки вдоль диаметрального сечения *а-а* ее полутонового изображения при отсутствии вибрации; b – текущий уровень бинарного изображения; l_0 – радиус изображения метки при отсутствии вибрации.

На рис. 1,*д* показано распределение интенсивности бинарного изображения метки вдоль диаметрального сечения *а-а* ее полутонового изображения при наличии вибрации; l_z – радиус изображения метки при наличии вибрации; $|L_z|$ – абсолютная величина приращения радиуса изображения метки, вызванного вибрацией.

Чем большую часть времени экспозиции точка приемной матрицы регистрирующего устройства подвергается воздействию светового потока, отраженного от метки, тем большая интенсивность регистрируемого излучения будет накоплена к моменту окончания времени экспозиции.

Область 1 изображения метки при наличии вибрации, расположенная внутри внутреннего пунктира (рис. 1,*а*), постоянно подвергается воздействию отраженного от метки светового потока, а область 2 изображения метки, расположенная между внутренним и внешним пунктирами, подвергается воздействию этого светового потока только часть времени экспозиции. Причем эта часть тем меньше, чем больше расстояние от точки области изображения между двумя пунктирами до центра тяжести изображения метки. Поэтому и интенсивность регистрируемого излучения в области 2 убывает по мере удаления от центра тяжести размытого изображения метки (рис. 1,*в*).

Первым этапом принятия решения о принадлежности пикселя изображению метки является бинаризация исходного полутонового изображения, т.е. присвоение каждому пикселю либо уровня логического нуля, либо уровня логической единицы. При простейшей уровнево-пороговой бинаризации уровень логической единицы присваивается пикселю в том случае, если интенсивность регистрируемого излучения в этом пикселе превышает некоторый уровень, называемый порогом бинаризации.

Как видно из диаграмм рис. 1,*г*,*д*, если уровень порога бинаризации выше $U/2$, то радиус размытого изображения будет меньше, чем радиус четкого изображения. Чем больше вибрационное перемещение, тем выше уровень размытия и тем, следовательно больше, по абсолютной величине, разность между радиусами размытого и четкого изображения. Именно эта абсолютная величина разности $|L_z|$ между радиусами размытого и четкого изображений метки является измерительным сигналом вибрационного перемещения исследуемой материальной точки.

Предельная абсолютная погрешность измерительного сигнала

Измерение абсолютной величины разности $|L_z|$ между радиусами размытого и четкого изображений метки является косвенным, для чего осуществляются вычисления на основе прямых замеров площади двух изображений метки: четкого при отсутствии вибрации и размытого при наличии вибрации. Эти замеры заключаются в подсчете количества пикселей, принадлежащих изображению метки:

$$S_{imt} = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\xi_{imt}(i,j), \tag{1}$$

где S_{imt} – площадь изображения метки, измеренная в run^2; i и j – порядковые номера соответственно строки и столбца матрицы цифрового растрового изображения, на пересечении которых расположен пиксель; I, J – количества строк и столбцов сканируемой матрицы цифрового растрового изображения соответственно; ξ_{imt} – функция, принимающая значение, равное 1 run^2, если пиксель с дискретными координатами (i, j) принадлежит изображению метки, и равное нулю в противном случае:

$$S_{imt0} = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\xi_{imt0}(i,j), \tag{2}$$

где S_{imt0} – площадь четкого изображения метки, полученного при отсутствии вибрации, измеренная в run^2; ξ_{imt0} – функция, принимающая значение, равное 1 run^2, если пиксель с дискретными координатами (i,j) принадлежит четкому изображению метки, полученному при отсутствии вибрации, и равное нулю в противном случае:

$$S_{imtz} = \sum_{i=1}^{I}\sum_{j=1}^{J}\xi_{imtz}(i,j), \tag{3}$$

где S_{imtz} – площадь размытого изображения метки, полученного при наличии вибрации, измеренная в run^2; ξ_{imtz} – функция, принимающая значение, равное 1 run^2, если пиксель с дискретными координатами (i,j) принадлежит размытому изображению метки, полученному при наличии вибрации, и равное нулю в противном случае.

Радиус изображения метки r_{imt} вычисляется по формуле

$$r_{imt} = \sqrt{\frac{S_{imt}}{\pi}}\,. \tag{4}$$

Таким образом:

$$l_0 = \sqrt{\frac{S_{imt0}}{\pi}}\,, \tag{5}$$

где l_0 – радиус четкого изображения метки, полученного при отсутствии вибрации:

$$l_z = \sqrt{\frac{S_{imtz}}{\pi}}\,, \tag{6}$$

где l_z – радиус размытого изображения метки, полученного при наличии вибрации.

На основании этих измерений и вычислений вычисляется измерительный сигнал $|L_z|$:

$$|L_z| = |l_z - l_0|\,, \tag{7}$$

где $|L_z|$ – абсолютная величина разности между радиусами двух изображений метки: четкого, полученного при отсутствии вибрации, и размытого, полученного при наличии вибрации.

Источником погрешности измерения площади изображения метки S_{imt} является преобразование регистрирующим устройством непрерывного изображения метки в дискретное (рис. 2).

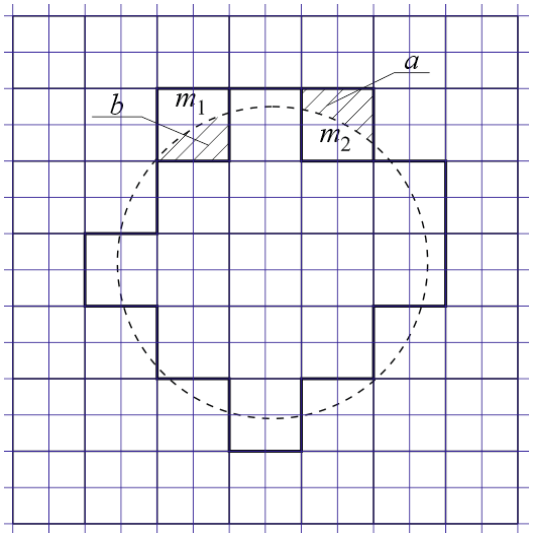


Рис. 2. Модель дискретизации изображения круглой метки

Пиксель, расположенный на периферии истинного непрерывного изображения метки, входит в зарегистрированное дискретное изображение метки, если большая часть его площади принадлежит непрерывному изображению метки, и не входит в противном случае. А меньшая часть пикселя, которая в первом случае не входит в изображение метки, а во втором входит, является элементарной погрешностью дискретизации изображения метки. На рис. 2 элементарные погрешности дискретизации изображения метки, вносимые пикселями *a* и *b* заштрихованы. Элементарная погрешность дискретизации изображения метки имеет знак «плюс», если она входит в зарегистрированное дискретное изображение метки, и «минус» – в противном случае. Элементарная погрешность дискретизации изображения метки ε_{pix} является случайной величиной, равномерно распределенной в диапазоне от минус 0,5 run^2 до 0,5 run^2. По формуле дисперсии равномерно распределенной случайной величины

$$D(\varepsilon_{pix}) = \frac{(\varepsilon_{pixU} - \varepsilon_{pixL})^2}{12}\,, \tag{8}$$

где $D(\varepsilon_{pix})$ – дисперсия случайной величины ε_{pix}; ε_{pixU} и ε_{pixL} – верхняя и нижняя границы погрешности ε_{pix} соответственно. $\varepsilon_{pixU} = 0{,}5\ run^2$, $\varepsilon_{pixL} = -0{,}5\ run^2$. Следовательно: $D(\varepsilon_{pix}) = (1/12)\ run^4$. Погрешность измерения площади изображения метки равна сумме элементарных погрешностей дискретизации этого изображения, вносимых пикселями, расположенными на периферии истинного непрерывного изображения метки.

Количество таких пикселей равно длине окружности непрерывного изображения метки, деленной на ожидаемое значение длины дуги этой окружности, расположенной в пределах пикселя (см. рис. 2):

$$N_{pit} = \frac{L_{imt}}{M(l_{pix})}, \tag{9}$$

где N_{pit} – количество периферийных пикселей изображения метки; L_{imt} – длина окружности истинного непрерывного изображения метки; $M(l_{pix})$ – математическое ожидание длины дуги окружности непрерывного изображения метки, расположенной в пределах пикселя.

Длина l_{pix} дуги окружности непрерывного изображения метки, расположенной в пределах пикселя, является случайной величиной, равномерно распределенной в пределах от нуля до $2^{1/2}run$ (см. рис. 2). Из этого следует, что $M(l_{pix}) = (2^{1/2}/2)run$. Длина окружности истинного непрерывного изображения метки

$$L_{imt} = 2\pi r_{imt}. \tag{10}$$

По формулам (9) и (10), принимая во внимание, что $M(l_{pix}) = (2^{1/2}/2)run$:

$$N_{pit} = 2\sqrt{2}run^{-1}\pi r_{imt}. \tag{11}$$

Далее по формуле (4)

$$N_{pit} = \sqrt{8run^{-2}\pi S_{imt}}. \tag{12}$$

Абсолютная погрешность измерения площади изображения метки определится как алгебраическая сумма элементарных погрешностей дискретизации изображения метки. Дисперсия суммы случайных величин равна сумме их дисперсий. Из этого следует, что

$$D(S_{imt}) = D(\varepsilon_{pix})N_{pit}. \tag{13}$$

Отсюда по формуле (12), принимая во внимание, что $D(\varepsilon_{pix}) = (1/12)run^4$:

$$D(S_{imt}) = \sqrt{\frac{1}{18}run^6\pi S_{imt}}. \tag{14}$$

Среднеквадратичное отклонение измеренного значения S_{imt}:

$$\sigma(S_{imt}) = \sqrt[4]{\frac{1}{18}run^6\pi S_{imt}}. \tag{15}$$

Поскольку погрешность измерения S_{imt} является суммой большого количества элементарных равномерно распределенных погрешностей ε_{pix}, согласно закону больших чисел, сама эта погрешность распределена по нормальному закону.

Если некоторая случайная величина X распределена по нормальному закону, то вероятность того, что ее значение находится в пределах $X \pm 3\sigma(X)$, превышает 0,997. Из этого следует, что измеренное значение S_{imt} с доверительной вероятностью 0,997 находится в пределах $S_{imt} \pm \Delta S_{imt}$, где $\Delta S_{imt} = 3\sigma(S_{imt})$. Величина ΔS_{imt} представляет собой предельную абсолютную погрешность измерения площади изображения метки. Верхняя S_{imtU} и нижняя S_{imtL} границы интервала охвата значений S_{imt}:

$$S_{imtU} = S_{imt} + \Delta S_{imt}; \tag{16}$$

$$S_{imtL} = S_{imt} - \Delta S_{imt}. \tag{17}$$

Заключение

Сформулирована сущность новой технологии измерения вибраций, для реализации которой на поверхность объекта наносится матрица круглых меток; регистрирующее устройство формирует изображения этой матрицы при отсутствии вибрации и при ее наличии; в качестве измерительного сигнала принимается абсолютная величина разности между радиусами размытого изображения метки, полученного при наличии вибрации и ее четкого изображения, полученного при отсутствии вибрации. Измерение радиуса изображения круглой метки является косвенным: сначала путем подсчета пикселей, принадлежащих изображению метки, измеряется площадь этого изображения, затем вычисляется радиус.

Библиографический список

1. Особенности разработки макромоделей надежности сложных электронных систем / Н. К. Юрков, А. В. Затылкин, С. Н. Полесский, И. А. Иванов, А. В. Лысенко // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 101–102.
2. *Lysenko, A. V.* Optimizing structure of complex technical system by heterogeneous vector criterion in interval form / A. V. Lysenko, I. I. Kochegarov, N. K. Yurkov, A. K. Grishko // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1015, iss. 4. – DOI 10.1088/1742-6596/1015/4/042032.
3. *Григорьев, А. В.* О качественном различии процессов статической и динамической калибровки виброметров, использующих размытие изображения круглой метки / А. В. Григорьев, М. В. Фомин, И. Ю. Наумова, В. А. Трусов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 2. – С. 79–82.
4. *Григорьев, А. В.* Динамическая калибровочная характеристика виброметра, использующего размытие изображения круглой метки / А. В. Григорьев, К. А. Чувашлев, И. Ю. Наумова, В. Я. Баннов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 2. – С. 82–85.
5. *Держевецкий, А. Л.* Автоматизированная система оптического допускового контроля печатных плат и фотошаблонов / А. Л. Держевецкий, А. В. Григорьев // Метрология. – 1995. – № 4. – С. 11–17.
6. *Григорьев, А. В.* Метод распознавания электронно-дифракционных рефлексов / А. В. Григорьев, А. Л. Держевецкий, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 1999. – С. 353–355.
7. *Григорьев, А. В.* Первичная обработка электронно-дифракционных поверхностей / А. В. Григорьев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2006. – Т. 1. – С. 197–198.
8. *Григорьев, А. В.* Способ обнаружения и идентификации латентных технологических дефектов печатных плат / А. В. Григорьев, А. Л. Держевецкий, Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2013. – Т. 1. – С. 15–19.
9. Принцип негативно-контурной классификации растровых элементов полутоновых изображений / А. В. Григорьев, А. Л. Держевецкий, В. Я. Баннов, В. А. Трусов, А. С. Кособоков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 2. – С. 21–24.
10. *Григорьев, А. В.* Нижний контур склона электронно-дифракционного рефлекса / А. В. Григорьев, А. Л. Держевецкий, И. Д. Граб, В. Я. Баннов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2009. – Т. 2. – С. 127–128.
11. *Григорьев, А. В.* Уточнение характеристических признаков и логического функционала структурно-разностной сегментации полутонового изображения / А. В. Григорьев, А. Л. Держевецкий // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2011. – Т. 2. – С. 312–315.
12. *Григорьев, А. В.* Классификация дефектов бортовой РЭА / А. В. Григорьев, Е. А. Данилова, А. Л. Держевецкий // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2013. – Т. 1. – С. 328–331.
13. Моделирование следа размытия изображения круглой метки при ее компланарном и ортогональном виброперемещениях / А. В. Григорьев, В. А. Трусов, В. Я. Баннов, П. Г. Андреев, Г. В. Таньков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 1. – С. 107–109.
14. Структура методики измерения параметров вибраций по следу размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, Е. А. Данилова, С. А. Бростилов, И. Ю. Наумова, Э. В. Лапшин, А. А. Баранов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 13–16.
15. Test station for fibre-optic pressure sensor of reflection type / T. Brostilova, S. Brostilov, N. Yurkov, V. Bannov, A. V. Grigorev // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science : Proceedings of the 13th International Conference on TCSET. – 2016. – Vol. 13. – P. 333–335.

References

1. Yurkov N. K., Zatylkin A. V., Polesskiy S. N., Ivanov I. A., Lysenko A. V. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international Symposium Reliability and quality]. 2014, vol. 1, pp. 101–102. [In Russian]
2. Lysenko A. V., Kochegarov I. I., Yurkov N. K., Grishko A. K. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1015, iss. 4. DOI 10.1088/1742-6596/1015/4/042032.

3. Grigor'ev A. V., Fomin M. V., Naumova I. Yu., Trusov V. A. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international Symposium Reliability and quality]. 2018, vol. 2, pp. 79–82. [In Russian]
4. Grigor'ev A. V., Chuvashlev K. A., Naumova I. Yu., Bannov V. Ya. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international Symposium Reliability and quality]. 2018, vol. 2, pp. 82–85. [In Russian]
5. Drzhevetskiy A. L., Grigor'ev A. V. *Metrologiya* [Metrology]. 1995, no. 4, pp. 11–17. [In Russian]
6. Grigor'ev A. V., Drzhevetskiy A. L., Yurkov N. K. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [ ]. 1999, pp. 353–355. [In Russian]
7. Grigor'ev A. V. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international Symposium Reliability and quality]. 2006, vol. 1, pp. 197–198. [In Russian]
8. Grigor'ev, A. V., Drzhevetskiy A. L., Yurkov N. K. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international Symposium Reliability and quality]. 2013, vol. 1, pp. 15–19. [In Russian]
9. Grigor'ev A. V., Drzhevetskiy A. L., Bannov V. Ya., Trusov V. A., Kosobokov A. S. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international Symposium Reliability and quality]. 2014, vol. 2, pp. 21–24. [In Russian]
10. Grigor'ev A. V., Drzhevetskiy A. L., Grab I. D., Bannov V. Ya. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international Symposium Reliability and quality]. 2009, vol. 2, pp. 127–128. [In Russian]
11. Grigor'ev A. V., Drzhevetskiy A. L. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international Symposium Reliability and quality]. 2011, vol. 2, pp. 312–315. [In Russian]
12. Grigor'ev A. V., Danilova E. A., Drzhevetskiy A. L. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international Symposium Reliability and quality]. 2013, vol. 1, pp. 328–331. [In Russian]
13. Grigor'ev A. V., Trusov V. A., Bannov V. Ya., Andreev P. G., Tan'kov G. V. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international Symposium Reliability and quality]. 2015, vol. 1, pp. 107–109. [In Russian]
14. Grigor'ev A. V., Danilova E. A., Brostilov S. A., Naumova I. Yu., Lapshin E. V., Baranov A. A. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international Symposium Reliability and quality]. 2015, vol. 2, pp. 13–16. [In Russian]
15. Brostilova T., Brostilov S., Yurkov N., Bannov V., Grigorev A. V. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science: Proceedings of the 13th International Conference on TCSET*. 2016, vol. 13, pp. 333–335.

Григорьев Алексей Валерьевич
кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: a_grigorev@mail.ru

Кочегаров Игорь Иванович
кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@mail.ru

Лысенко Алексей Владимирович
кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: lysenko_av@bk.ru

Grigoriev Alexey Valeryevich
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Kochegarov Igor Ivanovich
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Lysenko Alexey Vladimirovich
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Подсякин Андрей Сергеевич
аспирант,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kipra@pnzgu.ru

Юрков Николай Кондратьевич
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Podsyakin Andrey Sergeevich
postgraduate student,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Yurkov Nikolay Kondratievich
doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 004.932.2

Технология измерения аппликаты вибрационного перемещения на основе анализа размытия изображения круглой метки / А. В. Григорьев, И. И. Кочегаров, А. В. Лысенко, А. С. Подсякин, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 1 (25). – С. 45–53. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-5.

УДК 621.316 DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-6

А. А. Адамова, Л. Г. Аваева, А. В. Лохтуров

АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВ ИНТЕГРАЦИИ БЕСПРОВОДНЫХ СЕНСОРНЫХ СЕТЕЙ С СЕТЬЮ ИНТЕРНЕТ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТАНДАРТА 6LoWPAN[1]

A. A. Adamova, L. G. Avaeva, A. V. Lokhturov

ANALYSIS OF THE PROSPECTS FOR INTEGRATION OF WIRELESS SENSOR NETWORKS WITH THE INTERNET USING STANDARD 6LoWPAN

Аннотация. Развитие компьютерных технологий открывает широчайшие перспективы по внедрению сетей разнообразных датчиков. Развитие технологии беспроводной зарядки позволяет начать внедрять беспроводные сенсорные сети (БСС). Наличие многочисленных датчиков является необходимостью во многих сферах деятельности человека, например, нефтяная промышленность, авиационная сфера или агропромышленный комплекс. Использование БСС позволяет менять месторасположение датчиков и конфигурацию сети. Также перспективным направлением является использование искусственного интеллекта и технологий машинного обучения для оптимизации количества и качества данных. Использование БСС затрудняется особенностями использования технологии беспроводной зарядки и необходимостью осуществления построения выделенной сети для управления БСС и передачи данных.

Ключевые слова: беспроводные сенсорные сети, IEEE 802.15.4, 6LoWPAN, искусственный интеллект, машинное обучение, WiFi, IEEE 802.11, беспроводные сенсорные сети, PoWiFi, беспроводная зарядка.

Abstract. The evolution of computer technology opens up great prospects for the integration of networks of various sensors. The evolution of wireless charging technology allows to start implementing wireless sensor networks (WSN). The presence of multiple sensors is a necessity in many spheres of human activity, such as the oil industry, aviation or agriculture. The use of WSN allows to change the location of sensors and network configuration. Another promising area is the use of artificial intelligence and machine learning technology to optimize the quantity and quality of data. The use of WSN is complicated by the peculiarities of the use of wireless charging technology and the need to build a dedicated network to control the WSN and data transmission.

Keywords: wireless sensor networks, IEEE 802.15.4, 6LoWPAN, artificial intelligence, machine learning, WiFi, IEEE 802.11, wireless sensor network, PoWiFi, wireless charger.

Реферат

Актуальность рассматриваемой темы обусловливается открывающимися возможностями в своевременном получении достоверных данных с использованием беспроводных сенсорных сетей. Целью исследования является выявление особенностей построения беспроводных сенсорных сетей (БСС), формализация недостатков существующих решений и нахождение путей для их устранения.

Современные сенсорные сети (СС) строятся в соответствии со стандартом IEEE 802.15.4, который использует модифицированный стек проколов IPv6 для реализации взаимодействия как между элементами СС, так и устройствами во внешних сетях. Использование данного стандарта позволяет снизить объемы передаваемых данных и упрощает маршрутизацию, но не обеспечивает должный уровень отказоустойчивости всей системы. Также, несмотря на перспективность БСС, необходимость использования технологий для беспроводной зарядки усложняет построение подобных сетей.

[1] Работа выполнена при частичной финансовой поддержке по Гранту РФФИ № 17-07-00689.

© Адамова А. А., Аваева Л. Г., Лохтуров А. В., 2019

Данная статья посвящена обзору используемых технологий, выявлению их недостатков и предложению путей их решения. В рамках статьи предложены варианты решения проблем, связанных с беспроводной зарядкой с использованием технологии Power over WiFi (PoWiFi). Данная технология требует резервирования одного диапазона частот для использования его в качестве канала для передачи энергетического пакета, другого для передачи данных. Диапазон и мощность передаваемого пакета на данном этапе развития технологии незначительны, а значит, для использования их в СС необходимо минимизировать потери питания и снизить энергопотребление датчика. В статье предложены способы решения описанных задач.

Рассмотрены несколько возможных архитектур построения БСС и различные модели взаимодействия между узлами таких сетей. Предложены методы взаимодействия, позволяющие снизить энергопотребление датчиков, обеспечить необходимый уровень отказоустойчивости всей БСС при сохранении достаточного уровня качества получаемых данных.

Введение

При проектировании беспроводных сенсорных сетей закладываются основные архитектурные и системотехнические решения, которые главным образом определяют эффективность, надежность и безопасность системы при эксплуатации в будущем. Последующие изменения и доработки структуры и принципов работы БСС зачастую требуют либо существенно больше времени и ресурсов, либо невозможны без кардинальных изменений архитектуры системы [1, 2]. Исходя из этого, необходимо уделять большое внимание используемой методике проектирования БСС, чтобы на начальном этапе построить наиболее корректную архитектуру и предложить соответствующие системотехнические решения. Для этого рассмотрим основные особенности проектирования и эксплуатации БСС.

В БСС сенсоры могут располагаться на значительном удалении от центрального блока управления. При этом ограниченный диапазон связи датчиков не позволяет им напрямую общаться с блоком управления. Для решения этой проблемы необходимо использовать промежуточные узлы и, как следствие этого, требуется использовать протоколы беспроводной маршрутизации [3, 4].

БСС строятся на следующих принципах [5–9]:

– эффективность использования энергии всегда является основным фактором, который влияет на все этапы проектирования БСС;

– сети датчиков ориентированы только на передачу данных;

– узлы ретрансляции могут агрегировать данные от нескольких соседних датчиков;

– из-за большого количества узлов в БСС не всегда возможно заранее назначить уникальный ID каждому сенсору, в связи с чем идентификатор может быть задан с учетом местоположения или по типу передаваемых данных;

– к датчикам не всегда есть возможность подвести питание по проводам или обеспечить стабильную зарядку аккумуляторных батарей.

Важной функцией сетевого уровня является обеспечение межсетевого взаимодействия БСС с другими БСС, системами управления и доступом к сети Интернет. Кроме этого, существует задача по оптимизации потребления энергопитания в рамках БСС. Основной проблемой в данном случае является избыточность работы беспроводных сетей. Так, для работы Wi-Fi сетей требуется постоянное подтверждение работы устройства.

Модель взаимодействия датчиков и устройств управления может быть построена по одной из двух схем:

1) прямое соединение – в данной модели взаимодействия клиент подключается к серверу для получения информации. Клиент является инициатором соединения;

2) обратное соединение – в данной модели взаимодействия сервер опрашивает клиентов об их состоянии и отправляет информацию, являясь инициатором соединения.

Данные модели проиллюстрированы на рис. 1.

Модель взаимодействий является важным аспектом в вопросе энергопотребления и проектирования архитектуры БСС. Если датчик постоянно находится в режиме ожидания соединения от сервера, то и его энергоресурс тратится постоянно, что является неэффективным решением при построении БСС. Несмотря на это, большинство сетей датчиков используют именно эту модель взаимодействия. Классические системы датчиков используют возможность постоянной зарядки от энергоканала по проводам, делают их использование проще, но в то же время снижают возможности для переконфигурирования или смены местоположения ранее установленных датчиков.

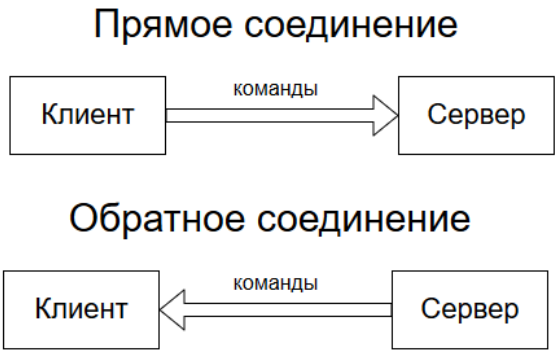


Рис. 1. Схемы взаимодействия клиент-сервер

Передача функции инициации соединения и принятия решения о начале передачи данных от сервера к датчику позволит использовать возможности беспроводной зарядки для накопления достаточного заряда, как для установления соединения и управляющим компонентом, так и для определения необходимости получения данных с датчика. Недостатком беспроводной зарядки PoWiFi является низкая мощность передаваемой энергии и необходимость использования одного из диапазонов WiFi или нижних диапазонов частот [10] для передачи зарядки и другого для передачи данных. Это ведет к усложнению структуры устройства, но данную проблему можно решить, если установить два контроллера беспроводного соединения или если чередовать прием энергии и передачу данных.

Еще одной проблемой является маршрутизация в рамках беспроводных сетей, так как стек проколов IP не позволяет эффективно использовать множественные маршрутизаторы, а все технологии балансировки нагрузки используют единый центр обработки запросов в том или ином виде. Как следствие, были разработаны стандарты, позволяющие избежать проблем.

Существующие стандарты сетевого взаимодействия позволяют разрабатывать решения для конкретных устройств или приложений, работающих с БСС. Одним из популярных решений в построении сетей датчиков является стандарт IEEE 802.15.4. Он предусматривает поиск ближайших маршрутизаторов в автоматизированном режиме и ориентирован на маломощные вычислительные среды. Основным преимуществом данного стандарта является изначальная ориентированность на сети датчиков, работа в стандартном диапазоне частот (например, 2.4 ГГц), оптимизация передаваемых данных и энергопотребления.

Вторым возможным решением является реализация данных функций в рамках стандартных протоколов стека IPv4 или IPv6 с использованием нейросети, машинного обучения или любых других средств для оптимизации, как количества передаваемых данных, так и энергопотребления. Этот подход является достаточно универсальным, так как разработанные решения можно использовать не только в рамках БСС. Но это несет за собой ряд серьезных недостатков:

– разработка не является стандартизированной;

– использование дополнительных элементов управления возможно и при использовании IEEE 802.15.4.

Создание собственных стандартов и реализация их в рамках стека IPv4 или IPv6 требуют широкой разработки новых протоколов и в целом являются повторением уже выполненной работы.

Автономные сети датчиков могут быть реализованы в рамках конкретных задач с использованием тех или иных технологий. Наиболее перспективным выглядит решение, связанное с использованием стандартизированных технологий. Оно предполагает построение БСС с использованием IEEE 802.15.4. Такие сети не могут быть легко интегрированы с сетью Интернет, поскольку протоколы на основе IEEE 802.15.4 [11] не являются совместимыми с сетевыми протоколами, используемыми для работы с сетью Интернет. В связи с этим датчики не могут легко взаимодействовать с другими БСС, серверами и браузерами. В качестве промежуточного звена между БСС и Интернетом выступает сетевой шлюз, работающий, с одной стороны, в БСС, используя стандарт IEEE 802.15.4, с другой – взаимодействуя в рамках стека протоколов, пригодных для доступа к сети Интернет. Подобный механизм взаимодействия БСС и всемирной паутиной имеет существенный недостаток, заключающийся в том, что выход из строя шлюза приводит к прекращению связи между БСС и Ин-

тернетом, т.е. фактически выводит из строя всю систему. В связи с этим необходимо выявить направление разработки и исследований, связанных с устранением данного недостатка.

Анализ стандарта 6LoWPAN

Для интеграции БСС с сетью Интернет IETF (Internet Engineering Task Force) разработан стандарт 6LoWPAN. Этот стандарт определяет реализации стека IPv6 поверх IEEE 802.15.4, чтобы позволить любому устройству в БСС быть доступным из сети Интернет.

Основная трудность для интеграции IPv6 и IEEE 802.15.4 заключалась в том, что заголовок IP-пакета по стандарту IPv6 имеет размер 40 байт, в то время как максимальный размер пакета (с учетом заголовка), передаваемого по стандарту IEEE 802.15.4, не может превышать 127 байт. В связи с этим прямая интеграция двух стандартов была бы неэффективной. Вместо этого в стандарте 6LoWPAN был добавлен уровень адаптации, позволяющий обоим стандартам работать сообща. 6LoWPAN предлагает отказаться от сложного 40-байтного заголовка IPv6 в пользу «стопки» из четырех типов заголовков. Тип заголовка выбирается в соответствии с типом отправляемого пакета. Размер заголовков был сжат с 40 до 4–5 байт, что сделало возможным использование таких заголовков в БСС.

В 6LoWPAN различают следующие типы заголовков [11], представленные в табл. 1.

Таблица 1

Типы заголовков в 6LoWPAN

Название	Размер	Значение
Заголовок отправки (Dispatchheader)	1 байт	Заголовок определяет тип следующего за ним заголовка. Первые 2 бита установлены на 01 для заголовка отправки, а остальные 6 бит определяют тип заголовка после него (несжатый заголовок IPv6 или заголовок сжатия заголовка)
Заголовок сетки (Meshheader)	4 байта	Заголовок идентифицируется 10 в первых двух битах и используется в сетке топологии для целей маршрутизации. Первые 2 бита сопровождаются дополнительными 2 битами, которые указывают, являются ли адреса источника и получателя 16-разрядными короткими или 64-разрядными адресами. 4-битное поле времени жизни пакета показывает оставшееся количество возможных передач данного пакета. Первоначально поддерживается 15 передач, но дополнительный байт может использоваться для поддержки 255 передач пакета. Остальные поля указывают источник и адрес назначения пакета. Эта информация может использоваться протоколами маршрутизации для нахождения следующего узла для передачи пакета
Заголовок фрагментации (Fragmentationheader)	4–5 байт	IPv6 может поддерживать полезную нагрузку (часть пакета без служебной информации) до 1280 байт, а IEEE 802.15.4 – всего 102 байта. Это решается путем фрагментации больших полезных нагрузок на несколько пакетов, и заголовок фрагментации используется для фрагментации и сборки этих пакетов. Первый фрагмент имеет заголовок в 4 байта, который обозначается 11 в первых двух битах и 000 в следующих 3 битах. За ними следуют поля блоков информации (датаграмм) и поля тега датаграммы. Следующий фрагмент имеет в заголовке 11100 в первых 5 битах, за которыми следует размер датаграммы, тег и смещение датаграммы
Заголовок сжатия заголовка (Headercompressionheader)	1 байт	40-байтовый заголовок IPv6 сжимается в 2 байта, включая заголовок сжатия заголовка. Для сжатия используется тот факт, что пакеты заголовков IEEE 802.15.4 уже включают MAC-адреса источника и адресата. Эти MAC-адреса могут быть сопоставлены с самыми младшими 64 битами IPv6-адреса. В итоге адреса источника и адресата полностью исключаются из заголовка IPv6. Аналогичные методы используются для удаления ненужных полей пакета для каждого сеанса общения и позволяют добавить эти поля, как только пакет достигнет шлюза для передачи в Интернет

Концепция интеграции беспроводных сенсорных сетей с сетью Интернет с использованием стандарта 6LoWPAN

При использовании беспроводных датчиков необходимо понимать, что современные технологии PoWiFi позволяют производить зарядку устройств на дистанции до 10 м с мощностью 100 мВт. Это в свою очередь накладывает дополнительные ограничения на использование датчиков как по мощности, так и по дальности от ближайшей точки беспроводной зарядки. Вся сеть на основе 6LoWPAN строится на сетке (mesh) передающих датчиков и множества маршрутизаторов. Концепция сети на базе 6LoWPAN представлена на рис. 2.

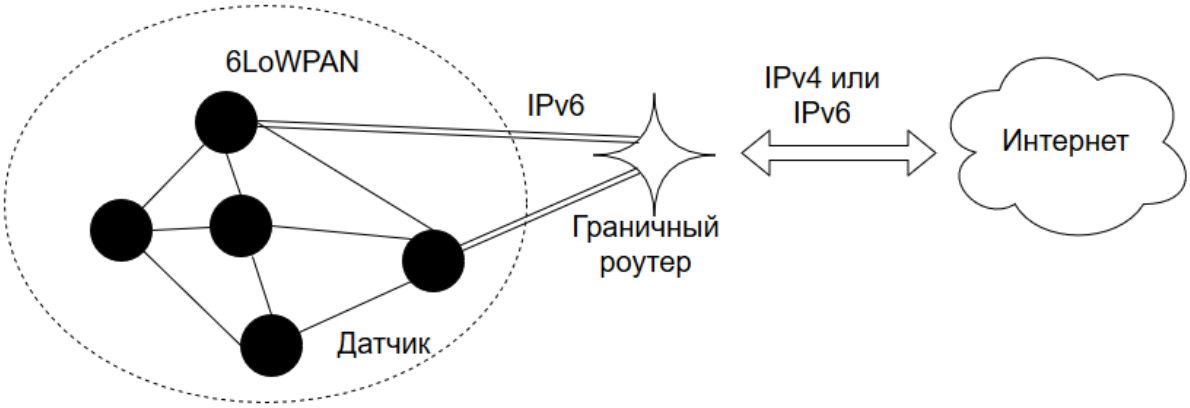


Рис. 2. Концепция структуры сети на базе 6LoWPAN

Из рис. 2 видно, что единой точкой отказа является граничный маршрутизатор, но стек протоколов IPv6 в отличие от IPv4, на котором строится 6LoWPAN, обладает протоколом автоматического поиска маршрутизатора в рамках протокола поиска соседей. Исходя из этого и из-за особенностей стека IP, необходимо понимать, что множественные точки выхода в сеть Интернет не желательны, особенно при учете возможности создания «петель» в сети и сложности в поддержании актуальных маршрутов. Использование множественных точек выхода в локальную сеть или всемирную паутину может привести к потере пакетов и, как следствие, к снижению эффективности работы БСС. В качестве решения данной проблемы и для обеспечения достаточного уровня отказоустойчивости системы возможно использование внешнего управляющего элемента для настройки или управления резервными граничными маршрутизаторами, которые могут находиться в режиме ожидания или выполнять вспомогательные функции. В отличие от датчиков или узлов маршрутизации БСС, которые должны выполнять как функцию маршрутизации данных, так и производить беспроводную зарядку, граничный маршрутизатор должен выполнять только роль передатчика данных и обязан быть зарезервирован так, чтобы не создавать дополнительных трудностей в эксплуатации БСС.

В рамках БСС должны использоваться датчики, которые могут работать в двух каналах беспроводной связи одновременно. Первый канал требуется для получения энергетических пакетов от mesh маршрутизатора, второй – для передачи данных. Это необходимо из-за особенностей работы технологи PoWiFi. Также определенную проблему составляет то, что датчики, неодинаково удаленные от точки беспроводной зарядки, могут получать разное количество энергии, что создает дополнительные сложности при проектировании данных сетей. В качестве решения может выступать дублирование датчиков или процесс опроса датчиков, подстраивающийся под зарядку датчика, также возможным решением будет объединение датчиков в логические группы и опрос сервером должен производиться с использованием этих логических групп.

Для улучшения показателей более оптимально использовать оба метода одновременно. Примером такой реализации может быть следующая схема взаимодействия:

– сервер формирует список опрашиваемых датчиков и отправляет их на узлы маршрутизации БСС;

– узлы маршрутизации БСС фиксируют список датчиков для опроса;

– датчик по накоплению достаточного количества энергии, для проверки статуса на ближайшем mesh маршрутизаторе и возможной последующей передачей данных, производит проверку и отправку данных при необходимости;

– узел маршрутизации БСС передает полученные данные на сервер.

Данный подход в себе сочетает два принципа организации клиент-серверного взаимодействия. В рамках соединения между узлом маршрутизации БСС и сервером используется инициализация соединения со стороны сервера, а между датчиком и ближайшим маршрутизатором инициатором выступает датчик. Снижение объема выполняемой работы влечет за собой снижение энергопотребления. Это позволяет более энергонезависимым устройствам выполнять сетевые взаимодействия более часто, что повышает актуальность и целостность данных, но при этом не требует от датчиков выполнять более сложный и энергозатратный процесс передачи данных постоянно, заменяя его в большинстве моментов на более простой процесс проверки необходимости передачи данных. Разделение работы датчика на эти два процесса может позволить производить проверку чаще, но не отменяет необходимость в дублировании датчиков и организации умного опроса. Также датчик должен обладать возможностью экстренно инициировать передачу на сервер в случае возникновения внештатной ситуации или пересечения граничных показателей. Такая схема взаимодействия также возможна в рамках описанной модели.

Сервер должен обладать возможностью проверки доступности граничного маршрутизатора, и в случае выхода его из строя или недоступности по другим причинам сервер должен перевести один из запасных граничных маршрутизаторов в основной режим работы. Сеть IPv6 позволяет использовать огромный диапазон уникальных IP адресов, что может позволить использование сетей датчиков в режиме доступности из любой точки мира, но данный вариант делает такие сети уязвимыми для сетевых атак. Возможным решением данной проблемы может выступать установление с граничных маршрутизаторов защищенного VPN туннеля с сервером для организации прямого соединения поверх любой существующей локальной сетевой инфраструктуры.

Заключение

Сжатие заголовков и использование IPv6 – не единственная проблема для интеграции БСС в сеть Интернет. Для обеспечения беспрепятственной передачи данных между БСС и сетью Интернет необходимо решить вопросы маршрутизации и контроля передачи данных, а также снизить зависимость от потребления энергии. Стандарт 6LoWPAN позволяет существенно упростить взаимодействие БСС, построенных по стандарту IEEE 802.15.4, с сетью Интернет, что открывает широкие перспективы для разработки и внедрения БСС в рамках направления IoT.

Кроме этого, для широкого использования БСС необходимо решить такие вопросы, как увеличение дальности беспроводной зарядки, резервирование единой точки отказа в виде граничного маршрутизатора, обновление ПО на датчиках или узлах маршрутизации БСС. Эти задачи требуют дополнительных исследований и разработок. Но часть описанных проблем может быть решена сейчас. Умный опрос датчиков можно организовать с использованием искусственного интеллекта или алгоритмов машинного обучения. Данные направления являются наиболее перспективными благодаря возможности адаптироваться со временем с учетом особенности каждой конкретной БСС.

Библиографический список

1. *Адамов, А. П.* Классификация состояний беспроводной сенсорной сети с использованием методов машинного обучения / А. П. Адамов, А. А. Адамова, М. Н. Юлдашев // Проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем (МЭС). – 2016. – № 2. – С. 248–251.
2. *Адамов, А. П.* Методы обеспечения надежности в беспроводных сенсорных сетях по критерию сетевой нагрузки / А. П. Адамов, А. А. Адамова, М. Н. Юлдашев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2016. – Т. 1. – С. 197–199.
3. *Власов, А. И.* Методы упреждающего прогнозирования состояния широкополосной сети связи / А. И. Власов, В. В. Иванов, Н. А. Косолапов // Программные продукты и системы. – 2011. – № 1. – С. 3–6.
4. Исследование методов синтеза распределенных сенсорных систем по критерию минимизации сетевой нагрузки / А. А. Адамова, А. Н. Алфимцев, А. И. Власов, С. Г. Семенцов, Т. А. Цивинская, М. Н. Юлдашев. – Москва : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. – 75 с. Отчет по НИР № 17-07-00689 от 01.01.2017.
5. *Адамов, А. П.* Способ надежного питания элементов сенсорной сети от беспроводного интерфейса / А. П. Адамов, С. Г. Семенцов // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 1 (21). – С. 79–83.
6. *Власов, А. И.* Анализ методов и средств обработки информации сенсорного кластера / А. И. Власов, М. Н. Юлдашев // Датчики и системы. – 2018. – № 1 (221). – С. 24–30.

7. *Yuldashev, M. N.* Energy-efficient algorithm for classification of states of wireless sensor network using machine learning methods / M. N. Yuldashev, A. I. Vlasov, A. N. Novikov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1015, № 032153.
8. Пат. 2556423 Российская Федерация. Способ функционирования беспроводной сенсорной сети / Шахнов В. А., Власов А. И., Резчикова Е. В., Токарев С. В., Смурыгин И. М., Денисенко Н. А., Муравьев К. А. ; заявл. 05.07.2013.
9. IEEE standard for information technology – telecommunications and information exchange between systems – local and metropolitan area networks – specific requirement part 15.4: wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (WPANS). IEEE Std. 802.15.4a-2007 (Amendment to IEEE Std. 802.15.4-2006). – 2007. – 203 p.
10. IPv6 over low power WPAN working group. – URL: http://tools.ietf.org/wg/6lowpan/

References

1. Adamov A. P., Adamova A. A., Yuldashev M. N. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem (MES)* [Problems of development of perspective micro-and nanoelectronic systems (MEA)]. 2016, no. 2, pp. 248–251. [In Russian]
2. Adamov A. P., Adamova A. A., Yuldashev M. N. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international Symposium Reliability and quality]. 2016, vol. 1, pp. 197–199. [In Russian]
3. Vlasov A. I., Ivanov V. V., Kosolapov N. A. *Programmnye produkty i sistemy* [Software products and systems]. 2011, no. 1, pp. 3–6. [In Russian]
4. Adamova A. A., Alfimtsev A. N., Vlasov A. I., Sementsov S. G., Tsivinskaya T. A., Yuldashev M. N. *Issledovanie metodov sinteza raspredelennykh sensornykh sistem po kriteriyu minimizatsii setevoy nagruzki* [Research of methods of synthesis of the distributed sensor systems on criterion of minimization of network load]. Moscow: MGTU im. N. E. Baumana, 2017, 75 p. Otchet po NIR № 17-07-00689 ot 01.01.2017. [In Russian]
5. Adamov A. P., Sementsov S. G. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 1 (21), pp. 79–83. [In Russian]
6. Vlasov A. I., Yuldashev M. N. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2018, no. 1 (221), pp. 24–30. [In Russian]
7. Yuldashev M. N., Vlasov A. I., Novikov A. N. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 1015, no. 032153.
8. Pat. 2556423 Russian Federation. *Sposob funktsionirovaniya besprovodnoy sensornoy seti* [Pat. 2556423 Russian Federation. The functioning of wireless sensor network]. Shakhnov V. A., Vlasov A. I., Rezchikova E. V., Tokarev S. V., Smurygin I. M., Denisenko N. A., Murav'ev K. A.; appl. 05.07.2013. [In Russian]
9. *IEEE standard for information technology – telecommunications and information exchange between systems – local and metropolitan area networks – specific requirement part 15.4: wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (WPANS). IEEE Std. 802.15.4a-2007 (Amendment to IEEE Std. 802.15.4-2006)*. 2007, 203 p.
10. *IPv6 over low power WPAN working group*. Available at: http://tools.ietf.org/wg/6lowpan/

Адамова Арина Александровна
кандидат технических наук, доцент,
кафедра проектирования и технологии производства электронной аппаратуры,
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
(105005 Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская 5, стр. 1)
E-mail: arina.adamova@rambler.ru

Аваева Лина Григорьевна
ассистент,
кафедра проектирования и технологии производства электронной аппаратуры,
Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана
(105005 Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская 5, стр. 1)
E-mail: arina.adamova@rambler.ru

Adamova Arina Alexandrovna
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of design and production technology of electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(105005, p. 1, 5 2nd Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Avaeva Lina Grigoryevna
assistant,
sub-department of design and production technology of electronic equipment,
Bauman Moscow State Technical University
(105005, p. 1, 5 2nd Baumanskaya street, Moscow, Russia)

Лохтуров Андрей Вячеславович
электроник,
отдел виртуализации вычислительных ресурсов
и облачных вычислений,
Московский государственный технический
университет им. Н. Э. Баумана
(105005 Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская 5, стр. 1)
E-mail: lohturovav@rambler.ru

Lokhturov Andrey Vyacheslavovich
electronics engineer,
department of virtualization of computing resources
and cloud computing,
Bauman Moscow State Technical University
(105005, p. 1, 5 2nd Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

УДК 621.316
Адамова, А. А.
Анализ перспектив интеграции беспроводных сенсорных сетей с сетью Интернет с использованием стандарта 6LoWPAN / А. А. Адамова, Л. Г. Аваева, А. В. Лохтуров // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 1 (25). – С. 54–61. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-6.

УДК 621.385 DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-7

А. А. Акимов, Н. В. Горячев, Д. В. Дерябин, А. А. Прошин, А. А. Рыжов

ПРОБЛЕМЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВАКУУМНЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

A. A. Akimov, N. V. Goryachev, D. V. Deryabin, A. A. Proshin, A. A. Ryzov

APPLICATION PROBLEMS OF VACUUM ELECTRONIC DEVICES

Аннотация. Данная статья представляет из себя энциклопедическую заметку, несущую в себе информацию об электронных вакуумных приборах. Материал разделен на четыре смысловых раздела. В первом, введении, рассказано об устройстве электронных вакуумных приборов в общем виде, описаны основные элементы, из которых состоит типовой прибор, и вкратце охвачены вопросы производства и эксплуатации. Второй раздел, классификация, дает нам понять, что вакуумных электронных приборов существует великое множество, большинство из которых приведены в разделе в виде списка, а на некоторых авторы решили заострить особое внимание. В частности, внимания удостоились электронные лампы, а также их подвиды: диод, триод, тетрод, пентод. Приведены их условные графические обозначения и формулы, дающие представление об их основных параметрах, таких как крутизна и внутреннее сопротивление. Третий раздел сосредоточен на особо востребованной в наши дни разновидности электронных вакуумных приборов, вакуумном реле. Охвачен вопрос их применения, на примерах показаны области, в которых устройства нашли себе место. Дан обзор производящих компаний и списка их продукции. В четвертом разделе, заключении, сделаны выводы по всему сказанному в данной статье.

Ключевые слова: вакуум, электрон, прибор, электрод, анод, катод, лампа.

Abstract. This article is an encyclopedic note that carries information about electronic vacuum devices. The material is divided into four semantic sections. In the first, introduction, it is told about the device of electronic vacuum devices in a general form, describes the main elements that make up a typical device, and briefly covered issues of production and operation. The second section, the classification, gives us to understand that there are a great many vacuum electronic devices, most of which are listed in the section as a list, and for some the authors decided to focus on special attention. In particular, attention was paid to electron tubes, as well as their subspecies: diode, triode, tetrode, pentode. Given their conventional graphics, and formulas that give an idea of their basic parameters, such as slope and internal resistance. The third section focuses on the currently popular variety of electronic vacuum devices, vacuum relays. The question of their application is covered, examples show areas in which devices have found a place for themselves. A review of manufacturing companies and their product list is given. In the fourth section, the conclusion, conclusions are drawn on everything said in this article.

Keywords: vacuum, electron, device, electrode, anode, cathode, lamp.

Введение

Вакуумные электронные приборы являются разновидностью электровакуумных приборов [1]. Основным их отличием является движение электронов в безвоздушной среде (вакууме). Их конструкция достаточно проста. Такие приборы представляют из себя герметично запаянные сосуды из самых разных материалов (стекло, металл, керамика), из которых, насколько это возможно, удаляется весь воздух, тем самым создавая искомый вакуум. Внутри сосуда располагаются электроды, имеющие связь с внешними контактами прибора путем использования стеклянных или керамических изоляторов. В процессе откачки воздуха из сосуда его внутренняя поверхность и находящиеся там компоненты прогреваются в целях максимально полного удаления абсорбированных газов, так как экспериментально проверено и подтверждено, что чем больше газов останется внутри, тем меньший срок службы будет у вакуумного прибора.

Выше было сказано об электродах, находящихся внутри сосуда, каждый вакуумный прибор несет их в себе. Количество электродов может варьироваться от прибора к прибору, однако основных электродов всегда два. Одним из них является катод с прямым или косвенным нагревом (однако встречаются и холодные, без нагрева), часто покрываемый специальным составом для лучшей эмис-

© Акимов А. А., Дерябин Д. В., Горячев Н. В., Прошин А. А., Рыжов А. А., 2019

сии электронов к рабочей зоне, а также анод, второй электрод, принимающий отработанные электроны. Нетрудно догадаться, что рабочим веществом всех приборов подобного типа является поток электронов, летящих в вакууме от катода к аноду и вступающих на своем пути во взаимодействие с простыми и сложными электродами.

Классификация

Вакуумные электронные приборы подразделяются на несколько основных классов:

1. Электронные лампы (диоды, триоды, тетроды, пентоды).
2. Вакуумные приборы СВЧ (магнетроны, клистроны, лампы бегущей и обратной волн) [2].
3. Электронно-лучевые приборы (электронно-лучевые трубки, кинескопы).
4. Ускорители заряженных частиц (рентгеновские трубки).
5. Фотоэлектронные приборы (фотоэлектронный умножитель, вакуумные фотоэлементы, электронно-оптический преобразователь).
6. Вакуумные индикаторы (магический глаз, вакуумно-люминесцентные индикаторы.

Остановимся на некоторых их них поподробнее.

Электронные лампы. Данный тип представляет из себя электровакуумный прибор, обладающий термоэлектронным катодом и электростатическим управлением потоком электронов [3]. Все вместе обеспечивают определение, генерацию и преобразование электрических сигналов. Для контроля электронного потока применяется разное количество электродов. Те, что не являются препятствием для потока электронов, именуют сетками. Число электродов и определяет конкретный подтип электронной лампы. Различают диоды, триоды, тетроды, пентоды и др.

Диод – вакуумный прибор, имеющий строго два электрода, анод и катод (рис. 1). Основной особенностью диода является то, что он способен проводить ток только в одном направлении, от катода к аноду, и применяется для преобразования переменного тока в постоянный. Испускаемые катодом электроны создают пространственный заряд между анодом и катодом [4]. В случае присутствия на аноде положительного потенциала, отрицательный барьер объемного заряда преодолевают самые быстрые электроны, создающие анодный ток во внешней цепи. Ток анода находится в жесткой зависимости от его напряжения, а также от катодного тока эмиссии. В процессе роста напряжения на аноде, возникают электроны, без труда преодолевающие отрицательный потенциал электронного заряда. В данных обстоятельствах ток эмиссии значительно превосходит ток анода. Важнейшими параметрами диода являются крутизна

$$S = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_a}$$

и внутреннее сопротивление лампы

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{1}{S},$$

являющееся величиной, обратной крутизне. В режиме пространственного заряда анодный ток растет в соответствии с законом степени трех вторых:

$$I_a = gU_a^{3/2},$$

где g – постоянная диода, зависящая исключительно от типа диода и размера его электродов [5, 6].

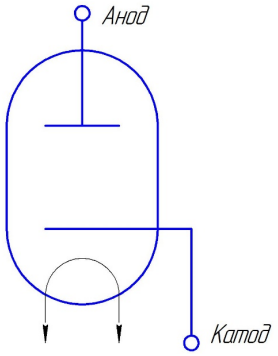


Рис. 1. Условное обозначение вакуумного диода

Триод – прибор, представляющий собой вакуумную лампу с тремя электродами, в центре которой, между анодом и катодом, располагается управляющая сетка (рис. 2).

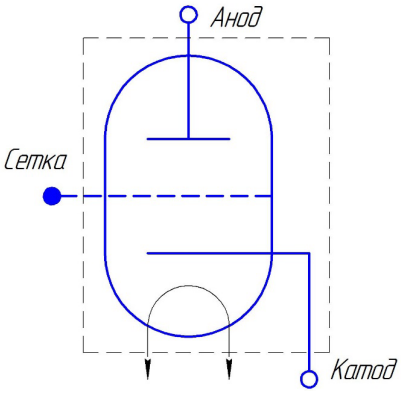


Рис. 2. Условное обозначение вакуумного триода

Значением тока анода в триоде возможно управлять, меняя значение потенциала сетки. Данная сетка делает возможным применение триодов в качестве усилителя или генератора электромагнитных колебаний. Основными параметрами триода можно назвать:

1) крутизну

$$S = \left.\frac{\partial I_a}{\partial U_c}\right|_{U_a = \text{const}};$$

2) внутренне сопротивление

$$R_i = \left.\frac{\partial U_a}{\partial I_a}\right|_{U_c = \text{const}};$$

3) статический коэффициент усиления

$$\mu = \left.\frac{\partial \Gamma_a}{\partial U_c}\right|_{U_c = \text{const}}.$$

Соотношение между параметрами принимает вид $SR_i = \mu$.

Параметры S, R_i, μ определяют влияние напряжений электродов на анодный ток. Ток катода зависит от проницаемости лампы $D = \left.\frac{\partial U_c}{\partial U_a}\right|_{I_k = \text{const}}$.

Основным недостатком триода можно назвать небольшой коэффициент усиления и слишком большую проходную емкость, формирующую обратную связь между входом и выходом лампы [7]. Падение характеристик обусловлено самовозбуждением в определенный период времени. Данного недостатка лишены тетроды и пентоды, у которых присутствуют дополнительные сетки, берущие на себя управление потоком электронов.

Тетрод – электровакуумная лампа, имеющая четыре электрода, одним из которых является вторая экранная сетка C_2, дающая возможность снижения проходной емкости (рис. 3).

Если тетрод находится в усилительной цепи, экранная сетка принимает на себя положительное постоянное напряжение. Электроны, проходящие через нее, отчасти перехватываются ею, формируя ток [8, 9]. Принимая это во внимание, стоит учитывать, что при этом может на два порядка уменьшиться проходная емкость лампы и увеличиться статический коэффициент усиления. При создании потока электронов в ленточной форме благодаря увеличению плотности пространственного заряда около анода образуется маленький потенциальный барьер, отражающий выпускаемые анодом вторичные электроны, что в свою очередь дает возможность не использовать еще одну, третью, сетку. Такой тип конструкции называют лучевым тетродом.

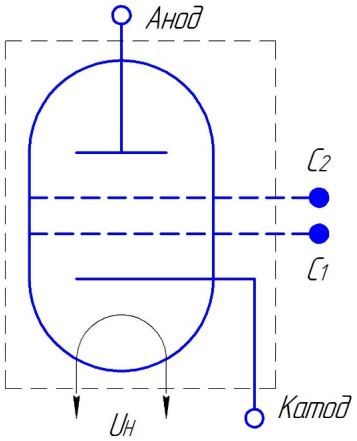


Рис. 3. Условное обозначение вакуумного тетрода

Говоря более конкретно, к тетродам можно отнести нувистор – небольшую приемно-усилительную лампу с цилиндрически расположенными электродами, состоящую из металлокерамического материала. Использование данного материала и такой конструкции дает повышенную стойкость к вибрациям и термическому воздействию.

Пентод имеет уже пять электродов (рис. 4). Благодаря наличию защитной сетки C_3, располагающейся между анодом и сеткой, служащей экраном, образуется поле, делающее невозможным попадание вторичных электронов на сетку C_2. Данная особенность минимизирует количество электронов, проникающих от анода к экранной сетке. Присутствующий у тетродов провал на анодной характеристике у пентода отсутствует.

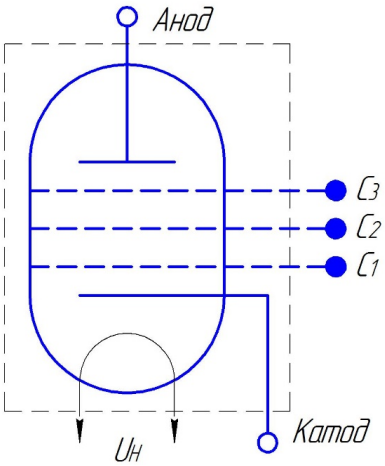


Рис. 4. Условное обозначение вакуумного пентода

На этом обзор электронных ламп можно завершить, переключившись на более востребованный в наши дни вакуумный прибор, вакуумный переключатель, или вакуумное реле.

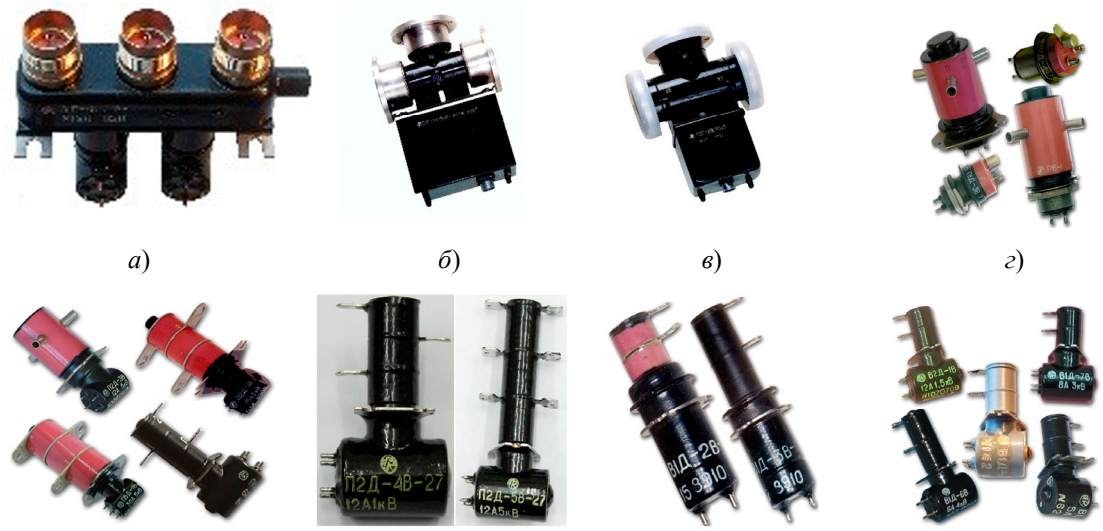
Вакуумное реле

Вакуумное реле – прибор, рассчитанный в первую очередь на применение в электрических цепях с высоким напряжением [10]. Своим названием он обязан особому типу используемой конструкции, представляющей из себя вакуумную камеру, за счет наличия которой становится возможным мгновенное гашение электрической дуги. Применяется также название «вакуумные высокочастотные коммутирующие устройства» (ВВКУ).

В основе принципа действия реле лежат физические свойства газа, располагающегося внутри корпуса прибора в разряженном состоянии. В данных обстоятельствах электрическая прочность газа, являющаяся одним из основных его свойств, заметно увеличивается [11].

Ток, протекающий по контактам устройства в момент разрыва, формирует дугу, электрический разряд. Высокая температура внутри запускает процесс ионизации паров металла, что неизбежно вызывает горение дуги. Ток не прекращает течь от контакта к контакту по образовавшейся плазме, пока он не перейдет к нулевой шине. В момент наступления этого перехода электрическая дуга гаснет, причем весь процесс занимает не больше 10 микросекунд [12, 13].

Ведущими производителями вакуумных переключателей по всему миру являются несколько компаний. В США это «Jennings Technology», «Kilovac Corporation» и «Gigavac», в Германии «Siemens», в России же АО «НИИЭМП» (г. Пенза), на нем и сосредоточим свое внимание [14].



а) *б*) *в*) *г*)

д) е) ж) и)

Рис. 5. Вакуумные реле, выпускаемые АО «НИИЭМП»

Номенклатура не сказать, что очень широка, но и скудной ее назвать сложно. Пройдемся по ней в виде списка:

1) вакуумные коаксиальные реле однополюсные на два направления П1Г-1В (рис. 5,*а*). Применяются при бестоковой коммутации высокочастотных цепей с волновым сопротивлением 75 Ом. Диапазон частот колеблется от 1,5 до 800 МГц;

2) вакуумные коаксиальные реле однополюсные на два направления П4Г-2В (рис. 5,*б*). Применяются при бестоковой коммутации высокочастотных цепей с волновым сопротивлением 50 Ом при прохождении через них непрерывно генерируемой мощности и мощности импульсного типа. Диапазон рабочих частот от 30 до 600 МГц;

3) вакуумные коаксиальные реле однополюсные на два направления П5Г-2В (рис. 5,*в*). Применяются при бестоковой коммутации высокочастотных цепей с волновым сопротивлением 75 Ом в технических устройствах КВ и УКВ диапазона, обладающих большой мощностью. Рабочая частота от 1,5 до 500 МГц;

4) вакуумные реле однополюсные на два направления (рис. 5,*г*). Применяются в высокочастотных цепях в режиме бестоковой коммутации. Диапазон частот от 1 до 80 МГц;

5) вакуумные реле однополюсные на два направления поляризованные (рис. 5,*д*). Применяются в высокочастотных цепях в режиме бестоковой коммутации. Частота варьируется от 0,15 до 80 МГц;

6) вакуумные реле однополюсные на два направления поляризованные П1Д-5В, П2Д-4В-12, П2Д-4В-27, П2Д-5В-12, П2Д-5В-27 (рис. 5,*е*). Применяются в высокочастотных цепях в режиме бестоковой коммутации. Диапазон частот от 1,5 до 120 МГц;

7) вакуумные реле однополюсные на одно направление (рис. 5,*ж*). Применяются в высокочастотных цепях в режиме бестоковой коммутации. Работают на частоте 2–80 МГц;

8) вакуумные реле однополюсные на одно направление поляризованные (рис. 5,*и*). Применяются в высокочастотных цепях в режиме бестоковой коммутации. Диапазон частот от 1,5 до 120 МГц.

Представленная номенклатура выпускаемой АО «НИИЭМП» продукции практически полностью покрывает потребности радиотехнической отрасли в вакуумных переключателях.

Заключение

В заключение стоит сказать, что хоть история вакуумных приборов насчитывает уже не один десяток лет, но, несмотря на переход электронной промышленности к миниатюризации радиотехники, вакуумные приборы (в частности переключатели) до сих пор не потеряли своей актуальности. Не изобрели пока прибора, который мог бы потягаться с ними в надежности, точности и скорости работы. Возможно, когда-нибудь это и произойдет и промышленность забудет такое понятие, как «вакуумное реле», но это явно перспектива очень далекого будущего. А до тех пор, пока этого не случилось, такие предприятия, как АО «НИИЭМП», «Kilovac Corporation», «Siemens» и другие, всегда будут иметь заказы на производство таких комплектующих.

Библиографический список

1. *Зоркин, А. Я.* Парциальные давления газовой фазы при наличии оксидов и карбидов в вакуумных электронных приборах / А. Я. Зоркин, С. В. Семенов, Н. А. Вавилина // Перспективы развития технических наук : сб. науч. тр. по итогам Междунар. науч.-практ. конф. «Инновационный центр развития образования и науки». – Челябинск, 2016. – С. 6–10.
2. *Лебедев, И. В.* Механизмы преобразования энергии в твердотельных и вакуумных СВЧ-приборах / И. В. Лебедев // Радиотехника. – 2017. – № 3. – С. 13–26.
3. *Зоркин, А. Я.* Газовыделение углерода и кислорода в вакуумных электронных приборах / А. Я. Зоркин, С. В. Семенов, Н. А. Вавилина, К. А. Ильин // Актуальные проблемы современной науки в 21 веке : сб. материалов XIV Междунар. науч.-практ. конф. – Махачкала, 2017. – С. 13–15.
4. Влияние геометрии катодов на усиление электрического поля в вакуумных приборах холодной эмиссии / А. А. Голишников, А. В. Емельянов, В. А. Жигалов, А. Ю. Красюков, В. А. Петухов, М. Г. Путря // Интеллектуальные системы и микросистемная техника : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф. – Нальчик, 2018. – С. 112–119.
5. *Попов, А. А.* Структурная оптимизация нечетких регрессионных моделей с минимизацией ошибки прогноза на обучающей и тестовой выборке / А. А. Попов, А. А. Холдонов // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2018. – № 2 (46). – С. 5–17.
6. Металлопористый катод вакуумного электронного прибора магнетронного типа с повышенной долговечностью и мгновенной готовностью / О. Д. Тищенко, А. Я. Зоркин, И. В. Родионов, И. В. Белова, А. А. Тищенко, С. В. Семенов // Фундаментальные исследования. – 2018. – № 3. – С. 18–23.
7. *Лукша, О. И.* Исследование влияния неоднородности эмиссии с катода на качество электронного потока в электронно-оптической системе гиротрона / О. И. Лукша, П. А. Трофимов // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2018. – № 1 (1). – С. 165–169.
8. Структура и схемотехническая реализация модуля автоматической накачки азота / А. А. Акимов, Д. В. Дерябин, В. П. Буц, Н. В. Горячев, Г. П. Разживина // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 1 (21). – С. 72–78.
9. Вакуумная электроника: ренессанс или стагнация / А. Григорьев, А. Иванов, В. Ильин, В. Лучинин // Наноиндустрия. – 2018. – Т. 11, № 5 (84). – С. 356–368.
10. *Ольховой, А. А.* Средства испытания на износостойкость вакуумных реле / А. А. Ольховой, А. Н. Винчаков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2014. – Т. 1. – С. 360–362.
11. *Штейзель, А. С.* Вакуумная микроэлектроника: преимущества, проблемы, перспективы / А. С. Штейзель, И. Н. Карманов // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2018. – Т. 9. – С. 19–24.
12. *Федотов, А. Ю.* Моделирование процессов образования и свойств наноструктур и нанопленок, сформированных в газовой среде / А. Ю. Федотов // Химическая физика и мезоскопия. – 2017. – Т. 19, № 2. – С. 230–249.
13. *Смирнов, Э. Н.* Вакуумные емкостные делители высоких напряжений : монография / Э. Н. Смирнов. – Пенза : Изд-во ПГУ, 2012. – 312 с.
14. АО «НИИЭМП». Официальный сайт. – URL: http://niiemp.ru/ (дата обращения 19.12.2018).

References

1. Zorkin A. Ya., Semenov S. V., Vavilina N. A. *Perspektivy razvitiya tekhnicheskikh nauk: sb. nauch. tr. po itogam Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Innovatsionnyy tsentr razvitiya obrazovaniya i nauki»* [Prospects for the development of technical Sciences : collection of scientific works. Tr. on the results of international. science.-prakt. conf. "Innovation center of education and science development"]. Chelyabinsk, 2016, pp. 6–10. [In Russian]
2. Lebedev I. V. *Radiotekhnika* [Radiotechnics]. 2017, no. 3, pp. 13–26. [In Russian]

3. Zorkin A. Ya., Semenov S. V., Vavilina N. A., Il'in K. A. *Aktual'nye problemy sovremennoy nauki v 21 veke: sb. materialov XIV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Actual problems of modern science in the 21st century : proceedings of the XIV Intern. science.-prakt. conf.]. Makhachkala, 2017, pp. 13–15. [In Russian]
4. Golishnikov A. A., Emel'yanov A. V., Zhigalov V. A., Krasyukov A. Yu., Petukhov V. A., Putrya M. G. *Intellektual'nye sistemy i mikrosistemnaya tekhnika: sb. tr. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Intelligent systems and Microsystem technology : sat. Tr. International. science.-prakt. conf.]. Nalchik, 2018, pp. 112–119. [In Russian]
5. Popov A. A., Kholdonov A. A. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki* [University proceedings. Volga region. Engineering sciences]. 2018, no. 2 (46), pp. 5–17. [In Russian]
6. Tishchenko O. D., Zorkin A. Ya., Rodionov I. V., Belova I. V., Tishchenko A. A., Semenov S. V. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental study]. 2018, no. 3, pp. 18–23. [In Russian]
7. Luksha O. I., Trofimov P. A. *Elektronika i mikroelektronika SVCh* [Electronics and microelectronics microwave]. 2018, no. 1 (1), pp. 165–169. [In Russian]
8. Akimov A. A., Deryabin D. V., Buts V. P., Goryachev N. V., Razzhivina G. P. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 1 (21), pp. 72–78. [In Russian]
9. Grigor'ev A., Ivanov A., Il'in V., Luchinin V. *Nanoindustriya* [Vacuum electronics: Renaissance or stagnation]. 2018, vol. 11, no. 5 (84), pp. 356–368. [In Russian]
10. Ol'khovoy A. A., Vinchakov A. N. *Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the international Symposium Reliability and quality]. 2014, vol. 1, pp. 360–362. [In Russian]
11. Shteyzel' A. S., Karmanov I. N. *Interekspo Geo-Sibir'* [Interexpo Geo-Siberia]. 2018, vol. 9, pp. 19–24. [In Russian]
12. Fedotov A. Yu. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya* [Chemical physics and mesoscopy]. 2017, vol. 19, no. 2, pp. 230–249. [In Russian]
13. Smirnov E. N. *Vakuumnye emkostnye deliteli vysokikh napryazheniy: monografiya* [High voltage vacuum capacitance dividers : monograph]. Penza: Izd-vo PGU, 2012, 312 p. [In Russian]
14. *AO «NIIEMP». Ofitsial'nyy sayt* [JSC "NIIEM". Official site]. Available at: http://niiemp.ru/ (accessed Dec. 19, 2018). [In Russian]

Акимов Александр Александрович
генеральный директор,
Пензенский научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(440000, Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: info@niiemp.ru

Горячев Николай Владимирович
кандидат технических наук, доцент,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ra4foc@yandex.ru

Дерябин Денис Викторович
заместитель генерального директора,
Пензенский научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(440000, Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: info@niiemp.ru

Прошин Алексей Анатольевич
аспирант, инженер,
кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: engineer.psu@yandex.ru

Akimov Aleksandr Aleksandrovich
director general,
Penza Research Institute
of Electronic and Mechanical Devices
(440000, 44 Karakozova street, Penza, Russia)

Goryachev Nikolay Vladimirovich
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Derjabin Denis Viktorovich
deputy general director,
Penza Research Institute
of Electronic and Mechanical Devices
(440000, 44 Karakozova street, Penza, Russia)

Proshin Alexey Anatolevich
postgraduate student, engineer,
sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Рыжов Александр Алексеевич
кандидат технических наук, начальник НПК-1,
Пензенский научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(440000, Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: pgufr@mail.ru

Ryzhov Alexander Alekseevich
candidate of technical sciences, head of NPK-1,
Penza Research Institute
of Electronic and Mechanical Devices
(440000, 44 Karakozova street, Penza, Russia)

УДК 621.385

Проблемы применения вакуумных электронных приборов / А. А. Акимов, Н. В. Горячев, Д. В. Дерябин, А. А. Прошин, А. А. Рыжов // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 1 (25). – С. 62–69. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-7.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTIC METHODS OF ENSURING THE RELIABILITY AND THE QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

УДК 621.3 DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-8

А. В. Полтавский, Н. К. Юрков

ОТБОР ОПЕРАТОРОВ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ РАБОЧИХ МЕСТ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫМ КОМПЛЕКСАМ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

A. V. Poltavsky, N. K. Yurkov

SELECTION OF OPERATORS OF AUTOMATED WORKPLACES OF MULTIFUNCTIONAL COMPLEXES OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматриваются один из подходов и возможность использования информационных математических моделей для оценивания уровня подготовки операторов автоматизированных рабочих мест в контуре управления многофункциональных комплексов беспилотных летательных аппаратов. Выбор вида информационной модели при разработке многих информационно-измерительных и управляющих систем для оценивания показателей качества операторов рабочих обосновывается с учетом требуемой оценки результатов анализа основных характеристик применения системы по назначению. *Материалы и методы*. Информационная система для получения оценок моделирования основных показателей качества и функциональной эффективности, а также предъявления желаемых требований к отбору группы из операторов для автоматизированных рабочих мест (АРМ) в общей схеме управления многофункциональных комплексов беспилотных летательных аппаратов (КБЛА). *Результаты.* Определена система оценок информационно-измерительных и управляющих системам (ИИУС) таким об-

Abstract. *Background*. One of the approaches and the possibility of using information mathematical models for evaluating the level of training of operators of automated workplaces in the control loop of multifunctional complexes of unmanned aerial vehicles is considered. The choice of the type of information model in the development of many information-measuring and control systems for assessing the quality indicators of workers' operators is justified taking into account the required assessment of the results of the analysis of the main characteristics of the application of the system by purpose. *Materials and methods*. Information system for obtaining estimates of modeling the main indicators of quality and functional efficiency, as well as presenting the desired requirements for the selection of a group of operators for workstation in the general control scheme of multifunctional systems of unmanned aerial vehicles (UAV). *Results.* A system of assessments of information measuring and control system (IMCS) has been defined in such a way that the probability of correct qualification of workstation operators in the UAV is maximum. Solved the problem of finding an operator based on the formula for the total probability of an

© Полтавский А. В., Юрков Н. К., 2019

разом, чтобы вероятность правильной квалификации операторов АРМ в КБЛА была максимальной. Решена задача поиска оператора на основе формулы полной вероятности события. Получены также статистические оценки вероятностей доставки грузов. Доказана возможность реализации предложенного подхода к оцениванию действий операторов АРМ в современной технологической компьютеризированной среде «человек-машина» на основе широкого использования программно-аппаратных средств компьютерного (имитационного) моделирования и обследования объектов многоцелевых систем ИИУС для действующих (и вновь проектируемых) КБЛА. *Выводы.* Представленные результаты информационного моделирования могут быть рекомендованы, прежде всего, при разработке первичных актов как нормативных документов по формированию необходимых (желаемых) требований к соответствующему уровню (и степени) подготовки операторов АРМ для эргатических систем в многофункциональных КБЛА.

Ключевые слова: комплекс с БЛА, состав, структура, система.

event. Also obtained statistical estimates of the probabilities of delivery of goods. The possibility of implementing the proposed approach to evaluating the actions of automated workplace operators in modern computer-aided human-machine environment based on the extensive use of software and hardware of computer (simulation) modeling and inspection of objects of the multi-purpose IMCS for existing (and newly designed) UAV has been proved. *Conclusion.* The presented results of information modeling can be recommended, first of all, in the development of primary acts as regulatory documents on the formation of the necessary (desired) requirements for the appropriate level (and degree) of training of playstation operators for ergatic systems in multifunctional UAV.

Keywords: UAV complex, composition, weaponry, system.

Введение

Развитие современных эргатических систем (ЭС) с информационно-измерительными и управляющими системами (ИИУС), а также постоянная проблема обеспечения соблюдения необходимых мер безопасности в задачах управления объектами для множества сложных [1] технических систем (СТС) требуют совершенствования контроля проводимых операций и поиска новых методов информационного моделирования объектов с целью получения оценки наблюдаемых процессов в прогнозировании их надежности. Человек-оператор ЭС является неотъемлемым звеном в контуре управления звеньев ИИУС и данных СТС, и без учета такого важного звена в ней любые информационные модели функционирования СТС не могут в адекватной информационным процессам форме отражать наиболее существенные показатели качества и функциональной эффективности этих систем в целом. Одним из основных вероятностных показателей обеспечения устойчивости и безопасности функционирования объектов СТС, управляемого оператором, принято считать вероятность успешного выполнения задачи объектами СТС [1], управляемой человеком в ЭС на заданном интервале времени [0, T] – P^*. Особенно это обстоятельство касается в получении прогнозирования желаемых (требуемых) характеристик и адекватных процессам оценок для современных СТС и управляющих звеньев ИИУС робототехники, в которых коэффициент автономности очень гибок, т.е. может иметь достаточно широкий диапазон. Современные модели к отбору человека-оператора для ЭС очень часто базируются на методах экспертных оценок, которые в своей основе уже имеют «эвристический» характер, но и для устранения этого «недоверия» к нему, он может быть дополнен и другими подходами. Покажем один из возможных подходов к отбору человека-оператора звена ЭС автоматизированного рабочего (АРМ) места многофункциональным комплексам беспилотных летательных аппаратов.

Информационная система для получения оценок моделирования основных показателей качества и функциональной эффективности, а также предъявления желаемых требований к отбору группы из операторов для автоматизированных рабочих мест (АРМ) в общей схеме управления многофункциональных комплексов беспилотных летательных аппаратов (КБЛА) – это, как правило, информационно-аналитическая система для распознавания образов [2]. Например, когда оператор АРМ многофункционального КБЛА осуществил доставку груза с БЛА к объекту-цели (ОЦ), ему следует поставить необходимую оценку в журнал за результат этой работы и отнести его к определенной квалификационной группе на основании наблюдаемого эксперимента. Сам вопрос для квалификационных групп может быть решен методами экспертных оценок или путем информационно-

го моделирования, т.е. отсюда мы можем иметь несколько возможных классов из операторов для АРМ в структуре управления многофункциональным КБЛА, к одному из которых можно причислить того или иного оператора по результатам оценки показателей с измерительного комплекса доставки груза ОЦ с помощью многоцелевого БЛА. Применение вероятностных методов и информационных моделей для распознавания образов предусматривает, прежде всего, наличие вероятностных зависимостей между признаками распознаваемых объектов и их классами, к которым непосредственно относятся данные объекты. Отсюда следует то, что замысел такого проекта и создаваемая информационно-измерительная система (ИИС) для получения первичных оценок по результатам применения многофункционального КБЛА является вероятностной системой распознавания, в которой сами классы этих объектов – это квалификационные группы из «наземных летчиков» (операторов звена АРМ в контуре управления БЛА) определенного уровня и степени подготовки, а признаки распознаваемого объекта – основные показатели качества и функциональной эффективности по оценке результатов доставки грузов с помощью многоцелевого БЛА [1–5].

Постановка задачи

Пусть производится доставка одиночного груза к ОЦ, груз может попасть в область ОЦ на различном расстоянии от точки прицеливания (ТП) с помощью ИИУС. Следует построить информационно-измерительную систему при регистрации расстояний для того, чтобы дать оценку деятельности оператора АРМ и отнести его к определенной группе по уровню его квалификации – если груз доставлен ОЦ на расстоянии h от центра, меньшем h_1 ($h < h_1$), тогда оператору АРМ ставится оценка «отлично», если $h_1 < h < h_2$ – «хорошо», если $h_2 < h < h_3$ – «удовлетворительно», если $h > h_3$ – «неудовлетворительно». Принимаем допущения о том, что доставка груза операторами из различных квалификационных групп осуществляется с различной точностью относительно ОЦ, которая характеризуется параметром рассеивания – средним квадратическим (или стандартным) отклонением ошибок для каждой группы – σ_1, σ_2, σ_3 и σ_4, к тому же принимаем, пусть априори нам уже известны некоторые вероятности принадлежности оператора АРМ той или иной квалификационной группе $\{G_1, G_2, G_3, G_4\}$. Следует определить систему оценок ИИУС из $\{h_1, h_2, h_3\}$ таким образом, чтобы вероятность правильной квалификации операторов АРМ в структуре КБЛА была максимальной [1–4].

Решение задачи поиска оператора

Задачу решаем с помощью формулы полной вероятности события A в виде [1, 2]:

$$P(A) = \sum_{i=1}^{n} P(H_i) \cdot P(A \mid H_i), \tag{1}$$

где H_i – гипотезы $\sum_{i=1}^{n} P(H_i) = 1$; $P(A|H_i)$ – вероятность события A при условии H_i $(i = \overline{1,n})$.

Пусть A – событие, соответствующее определению «проведена правильная классификация по результатам доставки груза к ОЦ с БЛА»; гипотеза H_i – оператор АРМ, принадлежащий к i-й отборочной классификационной группе $(i = \overline{1,n})$.

Из постановки задачи следует, что вероятность $P(H_i) = G_i$, $(i = \overline{1,n})$; $P(A|H_i)$ – вероятность правильной классификации при условии, что оператор АРМ многофункционального КБЛА принадлежит к i-й классификационной группе; $P(A|H_i)$ можно вычислить как вероятность попадания груза в круг ОЦ с радиусом внутренней окружности h_{i-1} и радиусом внешней окружности h_i ($h_{i-1} < h_i$), при рассеивании груза относительно центра ОЦ, которое соответствует летчику-оператору АРМ в составе ЭС многофункционального КБЛА i-й классификационной группы. Эти вероятности вычислим как разность между вероятностью попадания в круг радиуса h_i – $P(h_i)$ и вероятностью попадания в круг радиуса h_{i-1} – $P(h_{i-1})$:

$$P(A|H_i) = P_i(h_i) - P_i(h_{i-1}), \tag{2}$$

где индекс i при символе $P(\cdot)$ показывает, что данная вероятность вычисляется при рассеивании ошибок для операторов из i-й классификационной группы. Первое слагаемое в правой части последнего равенства зависит только от отклонения h_i, а второе – только от h_{i-1}.

Для $i = 1$, $h_{i-1} = h_0$ и $P(A|H_1)$ – вероятность попадания груза в круг ОЦ с радиусом h_1.

Для $i = n$, $P(A|H_n) = 1 - P_n(h_{n-1})$, так как $h_n \to \infty$. Таким образом, следует $P(A|H_1) = P_1(h_1)$; $P(A|H_2) = P_2(h_2) - P_2(h_1)$; ... $P(A|H_i) = P_i(h_i) - P_i(h_{i-1})$; ... $P(A|H_n) = 1 - P_n(h_{n-1})$.

Далее применим формулу для полной вероятности [1, 2], с помощью которой находим вероятность правильной классификации, т.е. вероятность того, что оператор АРМ в контуре управления многофункционального КБЛА [3, 4, 7] из выбранной классификационной группы претендентов попал на определенный (требуемый или желаемый) уровень подготовки и ему поставлена соответствующая оценка в нормативный журнал:

$$P(A) = h_1P_1(h_1) + h_2(P_2(h_2) - P_2(h_1)) + \ldots + h_i(P_i(h_i) - P_i(h_{i-1})) + \ldots + h_n(1 - P_n(h_{n-1})),$$

где n для нашей задачи информационного моделирования принято $n = 4$.

Решение поставленной задачи возможно по условию экстремума на основании [1, 2, 4]:

$$\frac{\partial P(A)}{\partial h_1} = 0, \ldots, \frac{\partial P(A)}{\partial h_i} = 0, \ldots, \frac{\partial P(A)}{\partial h_{n-1}} = 0.$$

$$\frac{\partial P(A)}{\partial h_1} = G_1 \frac{\partial P_1(h_1)}{\partial h_1} - G_2 \frac{\partial P_2(h_1)}{\partial h_1} = 0;$$

$$\frac{\partial P(A)}{\partial h_i} = G_i \frac{\partial P_i(h_i)}{\partial h_i} - G_{i+1} \frac{\partial P_{i+1}(h_i)}{\partial h_i} = 0; \qquad (3)$$

$$\ldots$$

$$\frac{\partial P(A)}{\partial h_{n-1}} = G_{n-1} \frac{\partial P_{n-1}(h_{n-1})}{\partial h_{n-1}} - G_n \frac{\partial P_n(h_{n-1})}{\partial h_{n-1}} = 0.$$

Таким образом, получена система из $n - 1$ уравнений для определения неизвестных $\{h_1, \ldots, h_{n-1}\}$, а каждое неизвестное в этой системе входит только в одно из $n - 1$ уравнений. Например, h_i определяем из уравнения как

$$\mathrm{G_i} \frac{\partial P_i(h_i)}{\partial h_i} - G_{i+1} \frac{\partial P_{i+1}(h_i)}{\partial h_i} = 0.$$

Классы объектов распознавания

Как отмечено выше, в системе ИИУС объектом распознавания является оператор АРМ с определенным уровнем (степенью) подготовки, а классы объектов – это группы операторов АРМ. Определим четыре класса по квалификационному уровню: отличные операторы АРМ, хорошо подготовленные операторы АРМ, удовлетворительные и неудовлетворительные операторы АРМ. Сам уровень подготовки операторов АРМ по указанным классам будем характеризовать средним квадратическим отклонением ошибок попадания (доставки) груза – σ (СКО), таким образом, условно считаем, что систематические ошибки малы. Точность доставки груза характеризуется по направлению полета σ_x и в боковом отклонении σ_z. В формируемой информационной модели ИИУС необходимо получить статистические оценки по доставке груза σ_x^*, σ_z^* и по результатам применения КБЛА. Для того, чтобы дать необходимую характеристику действиям оператора АРМ одним «точностным» параметром, следует определить среднее значение – $\sigma = \sqrt{\sigma_x \cdot \sigma_z}$. Структура из уровней подготовки операторов АРМ в системе ЭС – «отлично» подготовленные операторы – показатель G_1, «хорошо» подготовленные операторы – G_2, «удовлетворительно» подготовленные – G_3, «неудовлетворительные» – G_4. Уточнение этой структуры производится методом экспертных оценок в модели информационной системы, т.е. весь личный состав из операторов АРМ с вероятностью G_1 может принадлежать 1-й классификационной группе и с вероятностью G_2 ко 2-й. Допустим, что априори уже известен некоторый объект ОЦ с нормативным кругом радиуса h, при попадании в который оператору ставится оценка принадлежности к первой квалификационной группе («наземный летчик»-оператор в КБЛА первого класса). Если он не попадает в этот круг, тогда считается, что он принадлежит ко второй квалификационной группе. Принимаем допущение о том, что рассеивание точек падения груза – круговое, а сброс с БЛА проводится одиночным грузом. Соответственно, точ-

ность попадания авиагруза в область ОЦ из первой квалификационной группы характеризуется СКО – σ_1, а для второй группы – σ_2, $\sigma_1 < \sigma_2$, обозначим как $\equiv = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}$. Следует определить величину радиуса ОЦ h (как норматив) таким образом, чтобы вероятность правильной классификации (событие A) была максимальной. Имеем следующие две гипотезы: H_1 оператор АРМ принадлежит к первой классификационной группе, H_2 – оператор АРМ принадлежит ко второй группе. Вероятность данных гипотез находим по следующим формулам [1–5]:

$$P(H_1) = G_1 \text{ и } P(H_2) = G_2. \tag{4}$$

Далее определим радиус h в долях σ_2, чтобы найти коэффициент как радиус этой шкалы измерений (также в долях) в проектируемой ЭС по формуле $k = \frac{h}{\sigma_2}$ [6, 9].

Если оператор АРМ в контуре управления многофункционального КБЛА принадлежит к первой классификационной группе, тогда вероятность правильной классификации есть вероятность попадания его «внутрь» соответствующего круга и принятого радиуса h:

$$P(A \mid H_1) = 1 - e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{k}{\equiv}\right)^2}. \tag{5}$$

Если оператор АРМ системы ИИУС принадлежит к второй группе, тогда вероятность правильной классификации есть вероятность попадания вне круга радиуса h:

$$P(A \mid H_2) = e^{-\frac{1}{2}k^2}. \tag{6}$$

Применим формулу полной вероятности для нахождения вероятности события A – правильная классификация результатов работы оператора АРМ в контуре управления КБЛА:

$$P(A) = P(H_1) \cdot P(A \mid H_1) + P(H_2) \cdot P(A \mid H_2), P(A) = G_1\left(1 - e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{k}{\equiv}\right)^2}\right) + G_2 e^{-\frac{1}{2}k^2}. \tag{7}$$

Находим производную $P(A)$ по k в целях определения экстремума $P(A) = \max$:

$$\frac{dP(A)}{dk} = G_1 \frac{k}{\equiv^2} e^{-\frac{k^2}{2\equiv^2}} - G_2 k e^{-\frac{1}{2}k^2}, \frac{dP(A)}{dk} = 0,\ e^{-\frac{k^2}{2\equiv^2}} = \equiv^2 \frac{G_2}{G_1} e^{-\frac{k^2}{2}}, k \neq 0;$$

$$-\frac{k^2}{2\equiv^2} = \ln\frac{G_2}{G_1}\equiv^2 - \frac{k^2}{2} \Rightarrow k = \equiv\sqrt{\frac{2\ln\frac{G_2}{G_1}\equiv^2}{\equiv^2 - 1}}. \tag{8}$$

Из формулы (8) следует, что, зная соотношение СКО из соседних групп $(\equiv)$ в ЭС, можно найти такой радиус круга, который дает возможность определить квалификацию оператора АРМ для решения задачи, поставленной многофункциональным КБЛА с максимальной вероятностью.

Заключение

Представленные результаты информационного моделирования к создаваемым ИИУС могут быть рекомендованы, прежде всего, при разработке первичных актов как нормативных документов по формированию необходимых (желаемых) требований к соответствующему уровню (и степени) подготовки операторов АРМ для систем ЭС в многофункциональных КБЛА. В современной технологической компьютеризированной среде «человек-машина» предлагаемый подход к оцениванию действий операторов АРМ возможно реализовать на основе известных приемов – способов, алгоритмов и практикующих методик, которые основаны на широком использовании программно-аппаратных средств компьютерного (имитационного) моделирования и обследования объектов многоцелевых систем ИИУС для действующих (и вновь проектируемых) многофункциональных КБЛА [1, 2, 4, 5, 7, 8].

Библиографический список

1. *Северцев, Н. А.* Системный анализ и моделирование безопасности : учеб. пособие / Н. А. Северцев, В. К. Дедков. – Москва : Высш. шк., 2006. – 462 с.
2. *Полтавский, А. В.* Основы распознавания образов с помощью средств вычислительной техники / А. В. Полтавский // Двойные технологии. – 2017. – № 2 (79) – С. 55–66.
3. Научно-методические материалы по вероятностным задачам авиавооружения / под ред. И. Е. Казакова. – Москва : ВВИА, 1978 – С. 193.
4. *Полтавский, А. В.* Управление безопасностью движения беспилотного ЛА / А. В. Полтавский // Датчики и системы. – 2008. – № 9. – С. 4–8.
5. *Полтавский, А. В.* Модель измерительной системы в управлении БЛА / А. В. Полтавский // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2009. – № 10. – С. 73–77.
6. Decision making concept to create complex technical systems / A. V. Poltavsky, A. S. Zhumabaeva, A. V. Pivkin, A. M. Telegin, K. A. Ayzharikov // Reliability and quality of complex systems. – 2016. – № 2 (14). – P. 74–84.
7. *Полтавский, А. В.* Процесс обработки когерентных сигналов в приемниках глобальной спутниковой системы ГЛОНАСС / А. В. Полтавский, Е. В. Агулов // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты МЧС. – 2012. – № 3. – С. 16–21.
8. *Полтавский, А. В.* Модификация модели системы управлен-ия подвижным объектом / А. В. Полтавский, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 1 (5). – С. 65–70.
9. *Мубаракшин, Р. В.* Бортовые информационно-управляющие средства оснащения ЛА / Р. В. Мубаракшин, Н. В. Ким, М. Н. Красильщиков // МАИ. – 2003. – С. 54–89.

References

1. Severtsev N. A., Dedkov V. K. *Sistemnyy analiz i modelirovanie bezopasnosti: ucheb. posobie* [System analysis and modeling of security: proc. benefit]. Moscow: Vyssh. shk., 2006, 462 p. [In Russian]
2. Poltavskiy A. V. *Dvoynye tekhnologii* [Dual technology]. 2017, no. 2 (79), pp. 55–66. [In Russian]
3. *Nauchno-metodicheskie materialy po veroyatnostnym zadacham aviavooruzheniya* [Scientific-methodical materials on the probabilistic task of air combat materials]. Ed. by I. E. Kazakov. Moscow: VVIA, 1978, p. 193. [In Russian]
4. Poltavskiy A. V. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2008, no. 9, pp. 4–8. [In Russian]
5. Poltavskiy A. V. *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy* [Information-measuring and control systems]. 2009, no. 10, pp. 73–77. [In Russian]
6. Poltavsky A. V., Zhumabaeva A. S., Pivkin A. V., Telegin A. M., Ayzharikov K. A. *Reliability and quality of complex systems*. 2016, no. 2 (14), pp. 74–84.
7. Poltavskiy A. V., Agulov E. V. *Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoy zashchity MChS* [Scientific and educational problems of civil protection of Ministry of emergencies]. 2012, no. 3, pp. 16–21. [In Russian]
8. Poltavskiy A. V., Yurkov N. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2014, no. 1 (5), pp. 65–70. [In Russian]
9. Mubarakshin R. V., Kim N. V., Krasil'shchikov M. N. *MAI*. 2003, pp. 54–89. [In Russian]

Полтавский Александр Васильевич
доктор технических наук,
ведущий научный сотрудник,
Институт проблем управления
им. В. А. Трапезникова РАН
(117997, Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, 65)
E-mail: avp57avp@yandex.ru

Юрков Николай Кондратьевич
доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
заведующий кафедрой конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(440026, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: yurkov_NK@mail.ru

Poltavsky Alexander Vasilyevich
doctor of technical sciences, leading researcher,
Institute of management problems
named after V. A. Trapeznikov RAS
(117997, 65 Profsoyuznaya street, Moscow, Russia)

Yurkov Nikolay Kondratievich
doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
head of sub-department of radio equipment design
and production,
Penza State University
(440026, 40 Krasnaya street, Penza, Russia)

УДК 621.3
Полтавский, А. В.
Отбор операторов автоматизированных рабочих мест многофункциональным комплексам беспилотных летательных аппаратов / А. В. Полтавский, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 1 (25). – С. 70–76. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-8.

УДК 621.3 DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-9

Б. Ж. Куатов, А. Н. Коптев, С. Ж. Куртаев, Ю. В. Мясникова

ЗАДАЧА СИНТЕЗА МОДЕЛИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

B. Zh. Kuatov, A. N. Koptev, S. Zh. Kurtaev, Yu. V. Myasnikova

THE PROBLEM OF SYNTHESIS MODELS FOR CONTROL AND DIAGNOSTICS IN THE MANUFACTURE OF ELECTRICAL EQUIPMENT OF AIRCRAFTS

Аннотация. *Актуальность и цели*. С общих позиций сформулирована задача синтеза сети; представлены условия предпочтения из множества возможных решений задач проектирования и синтеза при построении моделей технологических процессов функционального контроля электротехнического оборудования на основе тензорного анализа и теории образов сетей объекта производства. *Материалы и методы*. Под задачей синтеза модели сети для контроля и диагностики электротехнического оборудования выбрана трехкомпонентная система, характеризуемая актуальным состоянием; императивной моделью желаемого состояния этого предмета или моделью потребного будущего, а также условиями (ограничениями), которые должны быть выполнены в процессе перевода предмета задачи из его актуального состояния в требуемое. Границы допустимой области множества значений сущностных свойств объекта определяются ресурсами, необходимыми для изготовления или использования объекта проектирования (ОП). *Результаты*. На языке логических методов анализа и синтеза схем, тензорном методе двойственных сетей доказано, что характерными особенностями объекта проектирования являются: во-первых, атомистичность структуры, обладающей различными математическими свойствами; во-вторых, характерна существенность отдельных связей на множестве введенных соединений; в-третьих, интерпретация объектов зависит от точки зрения наблюдателя, т.е. от того, каким образом он ее воспринимает; в-четвертых, должен быть точно определен характер соответствия между реальными и идеальными образами. *Выводы.* Показано, что при построении формализма образов и при изучении соответствующих структур необходимо пользоваться анализом регулярных структур в многочисленных конкретных ситуациях на базе теории образов и ее направлений, сформулированных У. Гренандером.

Ключевые слова: моделирование, синтез сети оборудования, структура объекта, задача проектирования, теория образов, тензорный анализ сетей.

Abstract. *Background*. The problem of network synthesis is formulated from a general point of view Presents the conditions of preference from the set of possible solutions to design and synthesis problems when building models of technological processes of functional control of electrical equipment based on tensor analysis and the theory of images of networks of a production facility. *Materials and methods*. The three-component system, characterized by the current state, was chosen for the task of synthesizing the network model for monitoring and diagnosing electrical equipment; the imperative model of the desired state of this subject or the model of the required future, as well as the conditions (restrictions) that must be fulfilled in the process of transferring the subject of the task from its current state to the required one. The boundaries of the permissible region of the set of values of the intrinsic properties of an object are determined by the resources necessary for the manufacture or use of a design object (OP). *Results.* In the language of logical methods of analysis and synthesis of schemes, the tensor method of dual networks, it has been proved that the characteristic features of the design object are: firstly, the atomistic structure with various mathematical properties; secondly, the materiality of individual bonds on the set of introduced compounds is characteristic; thirdly, the interpretation of objects depends on the point of view of the observer, i.e. how he perceives it. Fourth, the nature of the correspondence between real and ideal images must be precisely defined. *Conclusions.* It has been shown that when building a formalism of images and studying relevant structures, it is necessary to use the analysis of regular structures in numerous specific situations based on the theory of images and its directions formulated by W. Grenander.

Keywords: modeling, network synthesis equipment, the structure of the object, the task of designing, theory of images, tensor analysis of networks.

© Куатов Б. Ж., Коптев А. Н., Куртаев С. Ж., Мясникова Ю. В., 2019

Будем понимать под задачей синтеза модели сети для контроля и диагностики электротехнического оборудования (ЭТО) цель, данную в определенных условиях, и представим ее как трехкомпонентную систему

$$\left\langle D_{\text{а}}; D^{*}_{\text{тр}}; D_{\text{усл}} \right\rangle, \tag{1}$$

где $D_{\text{а}}$ – некоторый предмет задачи в актуальном (текущем, исходном) состоянии; $D^{*}_{\text{тр}}$ – императивная (виртуальная) модель желаемого состояния этого предмета или модель потребного будущего; $D_{\text{усл}}$ – условия, ограничения, которые должны быть выполнены в процессе перевода предмета задачи из его актуального состояния в требуемое.

По отношению к задаче проектирования (ЗП) компоненты системы (1) интерпретируются следующим образом [1]:

$D_{\text{а}}$ – заявка на ОП, представляющая потребности и мотивы, относящиеся к некоторому фрагменту действительности. Эту заявку в ЗП представляет целевая модель искомого объекта $M(O)_{\text{ц}}$;

$D^{*}_{\text{тр}}$ – продуктивная модель ОП $M(O)_{\text{цр}}$ – комплект технической документации для изготовления или использования объекта в производственных условиях, которая отвечает требованиям определенных стандартов (ЕСКД, ЕСТД или др.);

$D_{\text{усл}}$ – условия реализации задачи или ограничения на временные, трудовые, материальные ресурсы Q, выделяемые для решения данной ЗП.

Под ЗП любых объектов, в том числе сетей передачи информации, в дальнейшем понимается задача построения продуктивной модели объекта $M\left(O\right)_{\text{пр}}$, для которого определена целевая модель $M\left(O\right)_{\text{пр}}$ и установлены условия или ресурсы Q решения задачи, ЗП в обобщенной постановке может быть представлена кортежами

$$\text{ЗП} = \left\langle M\left(O\right)_{\text{ц}}, M\left(O\right)_{\text{пр}}, Q \right\rangle = \left\langle \left\langle FnM'\left(O\right), Z', Y', X', G \right\rangle, M\left(O\right)_{\text{пр}}, Q \right\rangle, \tag{2}$$

где компоненты Z', Y', X', G являются в общем случае векторами, имеющими свои размерности [2, 3].

Требования к функциональным свойствам ОП задаются в постановке ЗП в форме модели $FnM\left(O\right) \subseteq Y_{\text{н}} \times Z$. Требования к условиям функционирования ОП Z' задаются допустимыми областями множества возможных состояний среды (внешних Z_v или окрестностных Z_0 условий), а также продолжительностью функционирования $Y'_{\text{н}}$.

Требования к свойствам ОП помимо $FnM\left(O\right)$ ограничивают:

а) допустимую область множества возможных значений внешних (существенных и утилитарных) свойств ОП Y' для всех $z \in Z$;

б) допустимую область множества возможных значений внутренних (сущностных) свойств объекта X', которые характеризуют принципы его построения действия и обусловливают обладание множеством внешних свойств Y, согласованных с $FnM\left(O\right)$.

Границы допустимой области множества значений сущностных свойств объекта X' часто определяются ресурсами, необходимыми для изготовления или использования ОП. В общем случае ограничения могут касаться ресурса какого-либо одного вида (материалоемкости интегральной или по конкретным классам материалов, трудоемкости, энергоемкости, фондоемкости и т.д.) или одновременно нескольких видов.

Условия решения ЗП задаются допустимой областью значений ресурсов Q, выделенных для использования в процессе проектирования объекта. В качестве таких ресурсов обычно рассматриваются продолжительность решения, общая трудоемкость, полная стоимость решения ЗП. При этом стоимость проектирования может выражаться не только в виде денежных расходов, но и в количестве дефицитных материалов, времени использования уникального оборудования и т.п.

Условия предпочтения в допустимой области множества возможных решений ЗП определяются следующим [4–7].

1. Критерием эффективности или совершенства (КС), функцией ценности или качества объектов G, которые обобщенно характеризуют ценность данного ОП по ряду особо выделяемых его

внешних и/или внутренних свойств, а также параметров функционирования (*Y*'', *X*'', *Z*''). Последние признаются важнейшими по отношению к основной цели создания ОП, поэтому требования к ним представляется невозможным или нецелесообразным формулировать только в виде ограничений. В общем случае

$$G = Y'' \times X'' \times Z''. \tag{3}$$

Предпочтение должно быть отдано проектному решению с таким набором значений внешних $\overline{y} \in Y$ и внутренних $\overline{x} \in X$ свойств, реализуемых при $\overline{z} \in Z$, что

$$\overline{G}\left(\overline{X}, \overline{Y}, \overline{Z}\right) > G\left(X, Y, Z\right) \tag{4}$$

для всех допустимых $\overline{y} \in Y$, $\overline{x} \in X$, $\overline{z} \in Z$.

2. Оценочной функцией *M*, соотносящей внешние и внутренние свойства ОП при $\overline{z} \in Z$ с затратами (ресурсами) *Q*, необходимыми для реализации процесса проектирования. В общем случае

$$M : \left(X \times Y \times Z\right) \to Q, \tag{5}$$

и оценочная функция *M* характеризует затраты, определяемые в виде различных ресурсов (временных, трудовых, материальных и т. п.), на создание объекта с данным набором свойств. Предпочтение должно быть отдано проектному решению с таким набором внешних $\overline{y} \in Y$ и внутренних $\overline{x} \in X$ свойств, реализуемых при $\overline{z} \in Z$, что

$$\overline{M}\left(\overline{X}, \overline{Y}, \overline{Z}\right) > M\left(X, Y, Z\right) \tag{6}$$

для всех допустимых $\overline{y} \in Y$, $\overline{x} \in X$, $\overline{z} \in Z$.

Таким образом, все многообразие глобальных целевых ориентации ЗП любых ОП сводится к двум:

а) максимизировать эффективность *G* проектируемого объекта (допустимые затраты на процесс проектирования *Q* задаются в виде ограничений);

б) минимизировать затраты *Q* (временные, трудовые, материальные), необходимые для реализации процесса проектирования (требования к внешним *Y*, внутренним *X* свойствам и условиям функционирования *Z* ОП задаются в виде ограничений).

Для построения виртуальной сети контроля использован особый подход к процессу решения частной ЗП, который получил наименование выбора представлений для решения задачи. Этот подход предполагает существование упорядоченного и относительно устойчивого отношения предпочтения между тем, что понимается под типами представлений для решения задач, с одной стороны, и классами (наборами) методов решения задач, с другой [8].

Все множество представлений для решения задач инженерного проектирования может быть отнесено к трем основным типам: выбору из перечислений, определению в пространстве состояний, сведению задачи к подзадачам.

Использование представлений на основе выбора из перечислений возможно при наличии множества готовых, ранее спроектированных объектов (систем, устройств, компонентов, элементов схем, блоки из них и т.п.), описания которых в форме модели, отражающей систему или компоненту как некоторую целостность, или функциональной модели, характеризующей их как неделимую целостность, но в отличие от предыдущей только в аспекте определенных его отношений со средой или с другими объектами (например, участия в процессах связывания) доступны проектировщикам [9].

Решение ЗП при использовании представления по типу выбора из перечислений реализуется по следующей схеме:

– поиск для построения перечислений в виде упорядоченных множеств перечисленных выше моделей, готовых проектных решений, соответствующих по уровню сущности и основным свойствам назначения тем объектам, которые составляют предмет ЗП;

– выделение из множества потенциально возможных решений первой или второй моделей подмножества допустимых и целесообразных решений;

– выбор одного из ранее существовавших, готовых объектов в качестве наиболее предпочтительного решения данной ЗП.

Тот факт, что существующие объекты представляют собой решения других, ранее поставленных ЗП с иными условиями реализации КС, ограничениями и т.п., позволяет предположить, что использованию представлений на основе выбора из перечислений должно отдаваться предпочтение во всех случаях, когда требования к свойствам ОП задаются в виде ограничений, а целевая ориентация ЗП направлена на минимизацию временных, трудовых, материальных ресурсов, реализуемых в процессе создания нового, в частности, сети. Представления на основе выбора из перечислений широко используются при решении ЗП объектов низких уровней сущности: электрических схем проводов, деталей схем, микросхем небольшого уровня интеграции [9].

Использование представлений на основе определения в пространстве состояний предполагает наличие как возможность построения полной структурно-функциональной модели объектов того класса, к которому может быть отнесен конкретный объект данной ЗП, а также существование готовых ранее спроектированных компонентов и (или) элементов, из которых данный ОП может быть синтезирован. Эта модель отображает внутренние свойства X объекта на внешние Y, т.е. состав элементов объекта, состав и схему его внутренних связей, а также свойства этих элементов и связей на внешние свойства объекта. Она характеризует пространство возможных состояний объектов определенного класса в границах своей применимости для всех допускаемых данной моделью значений X и Y. Решение ЗП при использовании представления на основе определения в пространстве состояний заключается в формировании модели проектируемого объекта, что сводится к выбору модели значений ряда параметров, наилучших в смысле выполнения условий ЗП – продвижения в пространстве допустимых значений X и Y в ней.

Решение ЗП при использовании представлений по типу определения в пространстве состояний реализуется по следующей схеме:

– заимствование или построение множества структурно-функциональных моделей, потенциально пригодных для формирования частных моделей, отображающих отдельные структуры конкретного объекта, составляющего предмет данной ЗП;

– выбор или синтез полной, отображающей все выделяемые структуры модели, наилучшей в смысле конкретного объекта, условий реализации КС и ограничений данной ЗП; функционального построения частной структурной модели проектируемого объекта, т.е. параметризации полной, наилучшей в смысле КС объекта и условий реализации данной конкретной ЗП.

Тот факт, что из множества полных моделей объектов каждого данного класса может быть отобрана или построена, а затем интерпретирована (параметризована) именно та модель, которая в наибольшей степени соответствует условиям реализации любой данной ЗП, а также особенностям КС проектируемого объекта, позволяет предположить, что использованию представлений на основе определения в пространстве состояний должно отдаваться предпочтение во всех случаях, когда целевая ориентация ЗП направлена на достижение возможно более высокого значения КС проектируемого объекта [10].

Использование представлений на основе сведения задачи к подзадачам предполагает разбиение задачи на совокупность подзадач, решения которых приводят к выполнению исходной задачи. Процесс этот применяют рекурсивно для порождения подзадач, подподзадач и т.д. до тех пор, пока, наконец, не получится множество тривиальных задач, решения которых известны. Использование представлений на основе декомпозиции исходной задачи реализует принцип «редукция сложности» и в применении к ЗП эквивалентно разбиению проектируемого объекта на подобъекты более низкого уровня сущности и установлению связи между этими подобъектами. Разбиение проектируемого объекта – неизвестного целого – на подобъекты, которые в общем случае могут иметь различную степень определенности, также означает не что иное, как построение его структурно-функциональной модели, но для случаев, когда ряд выделяемых подобъектов (компонентов, элементов) не существует и они подлежат разработке в границах соответствующих подзадач.

Решение ЗП при использовании представлений по типу сведения задачи к подзадачам реализуется по следующей схеме:

– заимствование или построение множества моделей «модели описания», потенциально пригодных для формирования интепритаторов конкретного объекта, составляющего предмет данной ЗП (формирование множества возможных вариантов декомпозиции объекта проектирования на подобъекты);

– выбор моделей «модели описания», наилучшей в смысле возможности построения соответствующего объекта данной ЗП с учетом особенностей условий реализации задачи, КС и ограничений;

– построение «модели-интерпретатора» проектируемого объекта.

Представления на основе сведения задачи к подзадачам используются во всех случаях, когда в силу высоких уровней сущности или сложности проектируемых объектов или из-за отсутствия необходимых методов и средств ЗП не может быть решена на основе других типов представлений. Они используются и в тех случаях, когда целевая ориентация ЗП предполагает максимизацию степени использования готовых проектных решений (преемственности) на соподчиненных уровнях сущности проектируемого объекта.

Важно отметить тот факт, что в общем случае на разных стадиях решения каждой конкретной ЗП могут использоваться различные типы представлений: на высшем уровне решение по типу сведения задачи к подзадачам; на уровне составных единиц – по типу определения в пространстве состояний; на уровне элементов – по типу выбора из перечислений и т.п. При вариантном проектировании возможен «конкурс» типов представлений, когда одна и та же ЗП данного уровня сущности решается параллельно, на основе различных типов представлений, а окончательный выбор варианта производится на уровне сопоставления результатов полученных решений.

При решении ЗП различных объектов широко применяется вариантное проектирование. Оно реализуется за счет использования различных принципов построения или действия объекта данной ЗП; различных по степени полноты содержания и структуре моделей ОП для проработки каждого выбранного принципа их построения; различных методов формирования и параметризации каждой из выбранных моделей ОП.

Остановимся на постановке задач синтеза. Прежде всего остановимся на типах задач синтеза сети. При синтезе сетей передачи информации считают, что конструкционные константы (образующие непроизводные компоненты, используемые для построения конфигураций, подсетей и сетей в целом) не известны, и соединения между компонентами не установлены [10].

Рассмотрим постановку общей задачи синтеза сети. С общих позиций задача может быть сформулирована следующим образом.

Пусть даны определенные требуемые характеристики поведения сети передачи информации, и задача состоит в нахождении соотношения, которое должно существовать между компонентами будущей сети передачи информации, представляемой конфигурациями для решения конкретных задач, чтобы сеть работала требуемым образом. Эти соотношения между компонентами в конфигурации и сети в целом в соответствии с введенным выше определением будем называть «критерием эффективности» или «критерием требуемого поведения». Каждая конфигурация имеет свой тип критерия, определяемого ее составом и структурой.

В качестве образующей базы решения задачи синтеза любой сети используем то направление тензорного анализа, которое основал Г. Крон [1].

Для синтеза сети введем тензор синтеза C'_{σ} или как его компоненты тензор соединения или тензор преобразования, который занимает особое место среди тензоров, отождествляемых с компонентами этой сети.

На базе введенных понятий отметим, что теорией этих сетей является теория тензора преобразования $\mathbf{C}^{\alpha}_{\alpha'}$. Фундаментальная подобность сетей, описываемых тензором $\mathbf{C}^{\alpha}_{\alpha'}$, позволяет высказать предположение о существовании математического и физического подобия в технологии проектирования этих сетей и ее базовой составляющей – синтеза сети.

Для создания метода синтеза, описывающего проектирование сетей передачи информации, как многообразные преобразования набора образующих на этапах решения частных задач синтеза. Решением задачи будем называть способ получения заданного результата.

Математическая формулировка общей задачи синтеза обеспечивается следующей гипотезой, выдвинутой профессором Коптевым А. Н. [3], трансформируемой для целей данной работы следующим образом.

Процесс синтеза любой сети передачи информации есть процесс преобразования заданного пространства компонентов в пространство, состоящее из подпространств для решения конкретных задач, который может быть представлен тензорным уравнением, описывающим изменения пространства-структуры, в которое вложены как образующие, так и их соединения для реализации конкретной цели.

Таким образом, под процессом решения задачи синтеза или эквивалентным ему понятием процесса проектирования (ПП) будем понимать совокупность последовательно меняющихся состояний задачи, а значит, моделей объекта проектирования, рассматриваемых в прямой связи с действиями, реализующими эти изменения, в основе которых лежит представление о пространстве-структуре.

Основы теории представлений ЭТОЛА можно записать с помощью следующего математического формализма.

В теории представлений все пространство в целом – континуальное множество точек *N*. Однако носителем физических свойств этого пространства служит дискретное подмножество *M*, каждая точка которого является не только геометрической, но и вещественной

$$N = S_q \cup M_q; S_q \cap M_q = \varnothing \; ; q = 1,2,3, \tag{7}$$

где S_q – подмножество, дополнительное к M_q; $\varnothing$ – пустое множество.

Индекс q имеет следующий смысл. Описание всего пространства через подпространства S_1 и M_1 оказывается только необходимым, но недостаточным, так как связность подпространства нарушается тем, что дополняется подпространством M_1. Подпространство объекта, системы самолета или производства состоит из конечного множества точечных, дискретно расположенных компонент, каждая из которых представляет собой реальный элемент этого объекта, системы производства, обладающий конкретными специфическими свойствами. Описание этих специфических свойств компоненты требует ввода подпространства компонент, которое является дополнительным как к подпространству S_1, так и к M_1. Следовательно, для описания точки опорного пространства – компоненты в теории представлений производится такое переопределение координат этой компоненты, при котором дополнительное пространство (S_2 и M_2) описывается уже другой *n*-матрицей и другим геометрическим комплексом, т.е. становится другим, хотя по-прежнему евклидовым R^3 пространством. После описания каждой компоненты объекта или системы рассматривается единое подпространство компонент – свободное пространство объекта, системы, производства.

Сходное положение наблюдается и с описанием в третьем подпространстве с той (существенной) разницей, что в нем рассматриваются не только компоненты объекта или системы, или производства, а единое пространство различных цепей, в котором соединение узлов компонент – структура – задает само пространство этих цепей, размерность которого определяется числом линейно-независимых путей распространения в этой структуре информационных, материальных и энергетических потоков. Таким образом, каждое из континуальных подпространств S_q и дискретных M_q заполняет все пространство N, но в областях, принадлежащих дополнительным подпространствам, рассматривается только аналитическое продолжение данного подпространства.

Следовательно, принцип «дополнительности» отображен рядами дополнительных одна к другой величин, характеризующих объект или систему ЛА и производство его компонент в различных подпространствах. Каждый ряд физических величин, имеющих один и тот же смысл, выражен *n*-матрицей, а путь для электрических сигналов в геометрическом (топологическом) смысле представляет собой кривую, составленную из некоторого числа симплексов.

Одновременное рассмотрение всех характеризующих объект или систему величин, возможно лишь очень небольшим числом *n*-матриц. Организация этих величин в *n*-матрицы позволяет вводить новые дополнительные понятия в теории представлений ЭТО ЛА, само существование которых определяется этой организацией. С помощью *n*-матриц систематическим обозначением устанавливаются соотношения между известными величинами, удовлетворяющие некоторому критерию и обеспечивающие требуемое поведение объекта или системы ЭТО ЛА.

Суть применения топологии и тензорного анализа сетей в предлагаемой теории представлений заключается в следующем. Все различные объекты, системы ЛА, производства рассматриваются как проекции обобщенных объекта, системы, производства в частных системах координат пространства, структура которого различна и усложняется в зависимости от этапа их представления: для этапа макропредставления и представления компонент обычное, эвклидово и дискретное, для представления различных цепей – пространство-структура. Математический аппарат теории допускает существование в пространстве нескольких взаимно и последовательно ограниченных дополнительных

одно к другому подпространств $S_1 \cup M_1$, $S_2 \cup M_2$, $S_n \cup M_n$. Набор таких подпространств, достаточный для полного описания пространств в задачах изготовления деталей, сборки, монтажа, контроля и испытаний объектов, систем ЛА или отдельных участков производства и производства в целом, обозначен $S_q \cup M_q$. Число подпространств, необходимое для полного описания *N*, определяется одним критерием: последнее из них ($S_n \cup M_n$) должно описывать все соединения компонент, т.е. отражать сетевую структуру рассматриваемых объектов, систем, производств.

Введем в теорию представлений основные математические объекты и соотношения, устанавливаемые между ними для решения теоретических и практических задач. Предложенная выше методика представления опирается на эволюцию их представления от совокупности точек до совокупности точек, связанных структурой отношений. Структура отношений, развиваясь, переходит в понятие «пространство сетей», т.е. физически – в пространство-структуру. Оно включает компоненты сети, соединенные тем или иным способом. Это пространство, с одной стороны, дискретно, поскольку оно существует только вдоль выделенных каналов – геометрических линий, помещенных в обычное геометрическое пространство. Геометрические линии и последовательности линий образуют в этом пространстве пути, по которым распространяются информационные, материальные потоки и потоки энергии. Тогда, с точки зрения геометрии, объектами этого пространства, его линиями, состоящими из точек, являются пути.

В теории представлений для решения задач, связанных со структурами, состоящими из соединенных элементов, будем пользоваться методами комбинаторной топологии и теории гомологии [5].

В связи с этим введем топологические эквиваленты понятий, связанных со структурами ЭТО. Для изучения геометрических свойств объектов или систем будем рассматривать их как объединение очень простых элементарных фигур – симплексов. При этом узлам – монтажным точкам ЭС будем ставить в соответствие нульмерный симплекс $[\alpha_0]$; стропу, соединяющему два узла – одномерный симплекс $[\alpha_0, \alpha_1]$, а цепи – формально составленную сумму ориентированных одномерных симплексов

$$C^1 = a_1 S_1^1 + a_2 S_2^1 + \ldots + a_\alpha S_\alpha^1, \tag{8}$$

где S_1^1, S_2^1, …, S_α^1 – одномерные ориентированные симплексы, a_1, a_2,…, a_α – целые числа, связанные с конкретными компонентами.

Последовательность (8) представляет собой линейную комбинацию переменных S_1^1, S_2^1, …, S_α^1 с коэффициентами a_1, a_2, …, a_α. Умножение симплекса на –1 означает изменение его ориентации, т.е. $-1[\alpha_0, \alpha_1] = [\alpha_1, \alpha_0]$. Следует заметить, что выражение (8) представляет собой коммутативную (абелеву) группу.

Границей одномерного симплекса $S = [\alpha_0, \alpha_1]$ называется нульмерная последовательность

$$\partial S = \alpha_1 - \alpha_0, \tag{9}$$

а граница последовательности (3.3) определяется формулой

$$\partial C^1 = \sum_{i=1}^{i=\alpha} a_i \partial S_i^1 . \tag{10}$$

Операция определения границы представляет собой гомеоморфизм, преобразующий группу одномерных последовательностей в группу нульмерных последовательностей. Следовательно, рассматривая подмножество *R* компонент системы *F* и обозначив через R^* последовательность вида

$$R^* = \sum_{r_i \in R} r_i, \tag{11}$$

дадим определение цепи через топологические понятия.

Если для подмножества *R* элементов топологической системы *F* справедливы условия

$$\partial R^* = \alpha_i - \alpha_j ;\ \partial r_i = 0 , \tag{12}$$

где $R^* = \sum_{r_i \in R} r_i$, $\alpha_i \in \alpha_\ell R$, $\alpha_j \in \alpha_p R$, и где $\alpha_\ell R$ есть элемент левосторонней области (вход), а $\alpha_p R$ – элемент правосторонней области (выход), то множество R называется цепью системы F. Геометрическое изображение пути есть граф, в котором каждый симплекс – ребро, соединяющее вершины α_i и α_j.

Топологическим эквивалентом сети объекта или системы является комплекс (K), т.е. совокупность одномерных симплексов, обладающая определенными свойствами [7].

Множество цепей с произвольными целыми коэффициентами α_α представляет любой объект или систему ЭТО ЛА и составляет группу цепей по сложению

$$C^1(K) = \sum_{\nu} \{ \sum_{k=1}^{\alpha} a_k S_k^1 \} . \tag{13}$$

В теории представлений ЭТО рассматриваются только детерминированные объекты, которые можно представить как упорядоченные пары

$$A = \langle S, f \rangle \tag{14}$$

множества S одномерных симплексов и описывающей функции f. Для определения многозначной функции f со значениями из множества z натуральных чисел поставим в соответствие множества S и z:

$$f : S \to z. \tag{15}$$

Откуда следует, что функция f ставит в соответствие симплексам $S_i \in S$ натуральные числа z_i

$$f(S_i) = z_i, \tag{16}$$

т.е. каждому симплексу соответствуют различные числа z_i.

Топологический эквивалент объекта ЭТО, для которой определена описывающая функция f, при решении практических задач анализа этих объектов будем называть детерминированным графом или просто графом объекта или системы ЭТО ЛА.

Совокупности симплексов произвольной размерности S^n (двухмерных, трехмерных) обладают теми же свойствами, что и совокупности одномерных симплексов, они также позволяют изучать сложные фигуры теми же методами, которые использовались для изучения фигур, построенных из одномерных симплексов. Цепи размерности n в комплексе – это функция, которая каждому n-мерному симплексу S_k^n ставит в соответствие целое число a_k, причем $a_k \neq 0$ лишь для конечного числа симплексов S_k^n. А формальная линейная сумма – это лишь удобный вид записи цепи. При этом сумма двух цепей определяется как сумма двух линейных форм. Использование абстрактных структур, состоящих из абстрактных симплексов с абстрактным отношением инцидентности $S_i^n > S_i^{n-1}$, если (n – 1)-мерный симплекс входит в состав границы симплекса S_i^n, которое порождает во множестве симплексов упорядоченность, для моделирования ЭТО ЛА позволяет решить ряд очень сложных задач [11].

Рассмотрим построение формализма синтеза сети как некоторой регулярной структуры (РС). Формализм для описания синтеза РС нуждается в некоторой математической процедуре. Он должен обладать достаточной общностью для того, чтобы можно было применять ко всем тем многочисленным разновидностям РС, которые будут встречаться, но такой формализм должен обладать и гибкостью, обеспечивающей удобство пользования им, а также возможность опираться на его понятийную систему. Такой формализм не будет решать за нас задачи, но поможет точно сформулировать их, выделяя общие свойства внешне различных образующих сети (ОС). Следовательно, речь идет о построении некоторых объектов, в частности сетей, посредством комбинирования заданных объектов (образующих) в соответствии с определенными правилами их построения.

Правила ограничивают произвольность схем и конструкций из них: чем строже правила, тем жестче оказываются получаемые в результате их применения РС.

Как правило, при синтезе РС сети передачи информации используются геометрические образы, когда объектами служат множества, представляющие конкретные образующие, определяемые заданными правилами.

При синтезе сети встречаемся, прежде всего, с топологией структуры связей, которая представляется в явном виде. Различные понятия, которые введены выше, необходимо связать между

собой, т.е. для создания общего метода синтеза виртуальных сетей необходимо, чтобы его основные понятия естественно были согласованы друг с другом.

Примером, иллюстрирующим, что, собственно, мы имеем в виду, служит классическое понятие топологической группы. Топологическая группа – это не просто некоторое топологическое пространство – это пространство, на котором определена операция группы. Кроме того, необходимо, чтобы групповая операция была непрерывна относительно заданной топологии, т.е. алгебраические и топологические свойства связаны между собой.

Подобным же образом при формализации таких понятий, как «образующая», «конфигурация», «изображение» и т.д., должны быть согласованы, например, отношение связей соотносится с преобразованиями подобия посредством условия его *A* – инвариантности (инвариантности относительно группы преобразований подобия [1]). Будет встречаться и множество других ситуаций, когда будем стараться объединить различные теоретические требования в единую теорию метода.

Анализ большинства сетей как регулярных структур обладают тем общим свойством, что они сформулированы на математическом языке – логических методов анализа и синтеза схем, тензорном методе двойственных сетей.

Во-первых, очевидно, что все эти сети построены из некоторых элементарных объектов; т.е. атомистичны по своей природе. Сами эти объекты в различных конкретных случаях обладают различными математическими свойствами в соответствии с понятием «сходства», состоящем в том, что два объекта, в сущности, одинаковы, хотя не обязательно идентичны.

Во-вторых, эти объекты соединены друг с другом некоторым специальным способом, который иногда представляется схемой, описывающей топологию соединений. Существенность отдельных связей на множестве введенных соединений определяется специальными правилами. Можно сказать, что такие структуры являются комбинаторными.

В-третьих, комбинациям объектов, построенным в соответствии с определенными правилами, придается путем введения идеального наблюдателя некоторая интерпретация. Интерпретация, или значение, комбинации зависит от точки зрения наблюдателя, т.е. от того, каким образом он ее воспринимает.

И наконец, в-четвертых, реальные сети и, как следствие, их образы могут концептуально отличаться от только что упомянутых идеальных и, следовательно, характер соответствия между реальными и идеальными образами должен быть точно определен. Наше обсуждение до сих пор носило концептуальный характер, и мы лишь спорадически пользовались математическим формализмом.

Теперь переключимся на математическую формализацию регулярных структур. Такая формализация, выполняемая с помощью точно определенного языка, является необходимым предварительным этапом математического синтеза регулярных структур.

При построении формализма образов и при изучении соответствующих структур необходимо пользоваться анализом регулярных структур в многочисленных конкретных ситуациях на базе теории образов и ее направлений, сформулированных У. Гренандером [11].

Библиографический список

1. *Крон, Г.* Тензорный анализ сетей / Г. Крон. – Москва : Совет. радио, 1978. – 720 с.
2. Multicriteria Selection of the Optimal Variant of a Complex System Based on the Interval Analysis of Fuzzy Input Data / A. Grishko, E. Danilova, I. Rybakov, E. Lapshin, N. Goryachev, N. Yurkov // Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT) Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. – 2018. – P. 1–7. – DOI 10.1109/MWENT.2018.8337237
3. *Юрков, Н. К.* Модель оценивания риска отказа электронных средств длительного функционирования / Н. К. Юрков // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. – 2018. – Т. 1, № 1 (18). – С. 111–119.
4. *Полтавский, А. В.* Телекоммуникация сетевых систем на основе высотных платформ / А. В. Полтавский, З. Ф. Нгуен, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 1 (21). – С. 46–55. – DOI 10.21 685/2307-2018-1-6
5. *Goryachev, N.* Modelling thermoshock influence on printed units with metal ground / N. Goryachev, N. Yurkov, E. Danilova // International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018 (Sochi; Russian Federation; September 2018). CFP18RUS-ART; Код 141326. – Sochi, 2018.
6. *Смогунов, В. В.* Инженерия алгоритмов и моделей наноразрушений гетероструктур / В. В. Смогунов, Н. С. Кузнецов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2018. – № 1 (21). – С. 10–20. – DOI 10.21 685/2307-2018-1-2

7. О некоторых проблемах надежностно-ориентированного проектирования бортовых РЭС / С. И. Фролов, Н. В. Горячев, Г. В. Таньков, И. И. Кочегаров, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 2 (18). – С. 3–8. – DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-1.
8. *Смогунов, В. В.* Модели динамики гетероструктур электроэнергетики / В. В. Смогунов, Н. С. Кузнецов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. 2017. – № 3 (19). – С. 25–32. – DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-4.
9. *Коптев, А. Н.* Монтаж, контроль и испытания электротехнического оборудования летательных аппаратов / А. Н. Коптев, А. А. Миненков, Б. Н. Марьин, Ю. Л. Иванов. – Москва : Машиностроение, 1998. – 296 с.
10. *Артамонов, Д. В.* Математическое моделирование динамики гетерогенной структуры электронного блока при ударном воздействии / Д. В. Артамонов, А. Н. Литвинов, Н. К. Юрков // Надежность и качество сложных систем. – 2017. – № 3 (19). – С. 18–24. – DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-3.
11. *Гренандер, У.* Лекции по теории образов. Т. 1: Синтез образов / У. Гренандер. – Москва : Мир, 1979. – 383 с.

References

1. Kron G. *Tenzornyy analiz setey* [Tensor analysis of networks]. Moscow: Sovet. radio, 1978, 720 p. [In Russian]
2. Grishko A., Danilova E., Rybakov I., Lapshin E., Goryachev N., Yurkov N. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT) Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc*. 2018, pp. 1–7. DOI 10.1109/MWENT.2018.8337237
3. Yurkov N. K. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta grazhdanskoy aviatsii* [Bulletin of St. Petersburg state University of civil aviation]. 2018, vol. 1, no. 1 (18), pp. 111–119. [In Russian]
4. Poltavskiy A. V., Nguen Z. F., Yurkov N. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 1 (21), pp. 46–55. DOI 10.21 685/2307-2018-1-6 [In Russian]
5. Goryachev N., Yurkov N., Danilova E. *International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018 (Sochi; Russian Federation; September 2018). CFP18RUS-ART; Kod 141326*. Sochi, 2018.
6. Smogunov V. V., Kuznetsov N. S., Yurkov N. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2018, no. 1 (21), pp. 10–20. DOI 10.21 685/2307-2018-1-2 [In Russian]
7. Frolov S. I., Goryachev N. V., Tan'kov G. V., Kochegarov I. I., Yurkov N. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2017, no. 2 (18), pp. 3–8. DOI 10.21685/2307-4205-2017-2-1. [In Russian]
8. Smogunov V. V., Kuznetsov N. S., Yurkov N. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2017, no. 3 (19), pp. 25–32. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-4. [In Russian]
9. Koptev A. N., Minenkov A. A., Mar'in B. N., Ivanov Yu. L. *Montazh, kontrol' i ispytaniya elektrotekhnicheskogo oborudovaniya letatel'nykh apparatov* [Installation, control and testing of electrical equipment of aircraft]. Moscow: Mashinostroenie, 1998, 296 p. [In Russian]
10. Artamonov D. V., Litvinov A. N., Yurkov N. K. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2017, no. 3 (19), pp. 18–24. DOI 10.21685/2307-4205-2017-3-3. [In Russian]
11. Grenander U. *Lektsii po teorii obrazov. T. 1: Sintez obrazov* [Lectures on the theory of images. Vol. 1: Synthesis of images]. Moscow: Mir, 1979, 383 p. [In Russian]

Куатов Бауржан Жолдыбаевич
доктор PhD, доцент,
заместитель начальника по учебной
и научной работе,
Военный институт Сил воздушной обороны
Республики Казахстан им. Т. Я. Бегельдинова
(463024, Казахстан, г. Актобе пр. А. Молдагуловой, 16)
E-mail: kuatov.baurjan@mail.ru

Коптев Анатолий Никитович
доктор технических наук, профессор,
кафедра эксплуатации авиационной техники,
Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С. П. Королева
(443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: eat@ssau.ru

Kuatov Baurzhan Zholdybaevich
PhD, associate professor,
deputy chief for academic and scientific works,
Air Defense Forces of the Military Institute
of the Republic of Kazakhstan
named after T. Y. Begeldinov
(463024, 16 A. Moldagulova avenue, Aktobe, Kazakhstan)

Koptev Anatoly Nikitovich
doctor of technical sciences, professor,
sub-department of aviation maintenance technology,
Samara national research University
named after academician S. Korolev
(443086, 34 Moskovskoye highway, Samara, Russia)

Куртаев Сабит Жанбулатович
аспирант,
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева
(443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: sabit5@mail.ru

Мясникова Юлия Вадимовна
аспирант,
Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева
(443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: eat@ssau.ru

Kurtaev Sabit Janbulatovich
postgraduate student,
Samara national research University
named after academician S. Korolev
(443086, 34 Moskovskoye highway, Samara, Russia)

Myasnikova Julia Vadimovna
postgraduate student,
Samara national research University
named after academician S. Korolev
(443086, 34 Moskovskoye highway, Samara, Russia)

УДК 621.3
Куатов, Б. Ж.
Задача синтеза модели для контроля и диагностики при производстве электротехнического оборудования летательных аппаратов / Б. Ж. Куатов, А. Н. Коптев, С. Ж. Куртаев, Ю. В. Мясникова // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 1 (25). – С. 77–87. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-9.

УДК 621.396.6 DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-10

Б. Г. Ибрагимов, А. Г. Гасанов, А. А. Алиева, А. М. Исаев

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МУЛЬТИСЕРВИСНЫХ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СЕТЕЙ НА БАЗЕ АРХИТЕКТУРНОЙ КОНЦЕПЦИИ БУДУЩИХ СЕТЕЙ

B. G. Ibragimov, A. G. Gasanov, A. A. Alieva, A. M. Isaev

RESEARCH OF THE PERFORMANCE INDICATORS MULTISERVICE TELECOMMUNICATION NETWORKS BASED ON THE ARCHITECTURAL CONCEPT FUTURE NETWORKS

Аннотация. *Актуальность и цели*. Предметом исследования является анализ показателей качества функционирования мультисервисных телекоммуникационных сетей (МТС) на базе архитектурной концепции будущих сетей *FN* (Future Network) с использованием *SDN* & *NFV* (Software-Defined Networking & Network Functions Virtualization) и IMS (Internet Protocol Multimedia Subsystem) технологий, поддерживающих широкий спектр мультимедийных услуг. *Задача исследования* показателей отказоустойчивости функционирования, пропускные способности системы и угроза информационной безопасности в МТС на базе *FN* при оказании гарантированного качества обслуживания «Triple Play services» является наиболее актуальной. *Материалы и методы*. Для критерия показателей качества функционирования системы выбрана производительность МТС общего пользования, которая отражает способности системы при оказании гарантированного качества обслуживания *QoS* (Quality of Service) мультимедийных услуг. Целью настоящей работы является исследование и оценка характеристик производительности МТС на базе архитектурной концепции будущих сетей *FN* при передаче пакетов полезного и служебного трафиков. Для точного описания и оценки показателей отказоустойчивости функционирования системы, информационной безопасности сетей и граничных показателей качества обслуживания «Triple Play services» предложена математическая модель МТС на базе *FN*, учитывающая наличие множества ресурсов. Предлагаемая математическая модель (ММ) также учитывает показатели отказоустойчивости функционирования системы, особенности новых угроз информационной безопасности и пропускные способности МТС с использованием технологий *SDN*/*NFV* и *IMS*, а также свойства самоподобного случайного процесса с показателем Херста, *H*, лежащем в диапазоне $0{,}5 \le H < 1$. *Результаты и выводы*. В результате исследования предложена ММ, которая представля-

Abstract. *Background.* The subject of the research is the analysis of the performance indicators multiservice telecommunication networks (MTN) based on the architectural concept future networks FN (Future Network) using SDN & NFV (Software-Defined Networking & Network Functions Virtualization) and IMS (Internet Protocol Multimedia Subsystem) technologies supporting a wide range multimedia services. *The task of researching* the performance fault tolerance, system capacity and the threat information security in MTN based on FN when providing a guaranteed quality of service “Triple Play services” is the most urgent. *Materials and methods.* For the criterion of the performance of the system, the performance of the public service MTN was selected, which reflect the system's capabilities in providing guaranteed quality of service QoS (Quality of Service) multimedia services. The purpose this work is to study and evaluate the performance characteristics MTN based on the architectural concept of future FN networks in the transmission of packets useful and service traffic. For an accurate description and assessment of the performance of the system, the information security networks and the boundary indicators quality Triple Play services proposed a mathematical model of MTN based on FN, taking into account the presence many resources. The proposed mathematical model (MM) also takes into account the resiliency indicators of the system, features new information security threats and MTN throughput using SDN/NFV and IMS technologies, as well as the properties of a self-similar random process with the Hurst index *H* in the $0{,}5 \le H < 1$. *Results and conclusions*. As a result of the study, the proposed MM is a multi-channel general type $fBG/G/M_k/N_{бн}$ queuing system with heavy tails. On the basis of the model, analytical expressions are obtained that allow to evaluate the reliability indicators of the system, the information security factor of the software and hardware operation, and the average residence time of the packet of useful and service traffic at the MTN nodes.

© Ибрагимов Б. Г., Гасанов А. Г., Алиева А. А., Исаев А. М., 2019

ет собой многоканальную систему массового обслуживания общего типа $fBG/G/M_k/N_{бн}$ с тяжелыми хвостами. На основе модели получены аналитические выражения, которые позволяют оценить показатели надежности функционирования системы, коэффициента информационной безопасности функционирования программно-аппаратных средств и среднее время пребывания потока пакетов полезного и служебного трафиков в узлах МТС.

Ключевые слова: отказоустойчивость, межсетевые экраны, информационная безопасность, защита информации, надежность, производительность сети, несанкционированный доступ.

Keywords: fault tolerance, firewalls, information security, information protection, reliability, network performance, unauthorized access.

Введение

Проблема развития инфраструктуры цифровой экономики и формирование «Дорожной карты цифровизации» на основе перспективных информационно-коммуникационных технологий требуют создания мультисервисных телекоммуникационных сетей (МТС) на базе архитектурной концепции будущих сетей *FN* (Future Network) с повышенным показателем их качества функционирования [1, 2].

В настоящее время показателем качества функционирования системы являются комплексные характеристики МТС общего пользования на базе *FN* с использованием *SDN* & *NFV* (Software-Defined Networking & Network Functions Virtualization) и *IMS* (Internet Protocol Multimedia Subsystem) технологий [1, 2].

Одним из важных для критерия качества функционирования системы нами выбран показатель производительности МТС общего пользования, который отражает способность системы обеспечивать требуемые комплексные показатели отказоустойчивости функционирования системы, защиты информации от несанкционированных доступов, а также пропускные способности аппартно-программных средств при оказании гарантированного качества обслуживания *QoS* (Quality of Service) мультимедийных приложений [3, 4].

Задача исследования показателей надежности, пропускных способностей системы и оценки степени угрозы информационной безопасности в пакетной сети МТС на базе *FN* при передаче мультимедийных трафиков и при оказании «Triple Play services» (речи, данные, видео) является наиболее актуальной.

В работах [2, 4, 5] проанализированы методы улучшения отказоустойчивости функционирования системы, пропускные способности аппартно-программных средств МТС на базе *FN* и алгоритмы защиты информации от несанкционированного доступа. В работах [3, 6–8] исследованы качества функционирования МТС с использованием технологий будущих сетей *FN* и выявлены их основные сетевые показатели. Однако задача исследования качества функционирования МТС на базе сетей *FN* при обслуживании полезных и служебных трафиков еще полностью не решена.

Важный вопрос, возникающий при этом, – исследование и оценка показателей производительности МТС на базе *FN*, которая зависит как от показателей отказоустойчивости функционирования, от пропускных способностей системы, так и от алгоритмов защиты информации, характеризующих показатели качества функционирования системы.

В работе рассматривается решение сформулированной выше задачи – исследование и оценка характеристик производительности МТС на базе архитектурной концепции будущих сетей *FN* при оказании мультимедийных услуг.

Постановка задачи и построение математической модели МТС на базе FN

Для точного описания и оценки показателей отказоустойчивости функционирования системы, информационной безопасности сетей и граничных показателей качества обслуживания *QoS* потоков пакетов необходима разработка математической модели, учитывающей наличие множества ресурсов МТС на базе *FN*.

Установлено [2, 4, 6, 9], что исследуемые МТС на базе архитектурной концепции *FN* с использованием технологий *SDN*/*NFV* и *IMS* представляют собой систему массового обслуживания (СМО),

которая по кодировке Башарина – Кендалла соответствуют общему типу СМО $G/G/N_k/N_{бн}$ с некоторыми допущениями.

Допустим, что входящий поток пакетов в систему обслуживания имеет произвольные функции распределения с параметром λ_i, длительность обслуживания *i*-го трафика имеет функцию распределения $B(t)$ с моментами $B^{(i)}$. Предполагаем, что при критической загрузке $\rho_i < 1$, $i = \overline{1,n}$ в узлах МТС число мест для ожидания ограничено $N_{бн}$. Проведенные исследования показали [6, 9], что современный телекоммуникационный трафик, который можно рассматривать как локально-стационарный случайный процесс, обладает свойствами самоподобия с показателем Херста (*H*), лежащем в диапазоне $0{,}5 \le H < 1$. Тогда изучаемая ММ представляет собой многоканальную систему массового обслуживания общего типа $fBG/G/M_k/N_{бн}$ с тяжелыми хвостами.

На основе исследования установлено [2, 6], что основным и наиболее востребованным параметром мультимедийных услуг связи является производительность МТС. Производительность МТС на базе *FN* определяется количеством передаваемых потоков пакетов полезного и служебного трафиков в единицу времени в условиях заданной надежности и информационной безопасности, которые функционально описываются следующим зависимостью:

$$\Pi_{i.пр.}(\lambda_i, H) = W[E_{i.со.}, T_{i.в.пр}, K_{i.иб.}],\ i = \overline{1,n}, \tag{1}$$

где $\Pi_{i.пр.}(\lambda_i, H)$ – производительность программно-аппаратных средств МТС на основе концепции *FN* с учетом скорости поступления входящего потока λ_i и коэффициента H при оказании *i*-й мультимедийной услуги и функционального требования, $i = \overline{1,n}$; $E_{i.со.}$ – коэффициент сохранения отказоустойчивости программно-аппаратных средств МТС при оказании *i*-й мультимедийной услуги, $i = \overline{1,n}$; $\overline{T}_{i.в.пр.}$ – среднее время пребывания *i*-го потока пакетов полезного и служебного трафиков в узлах МТС, $i = \overline{1,n}$; $K_{i.иб.}$ – коэффициент информационной безопасности функционирования программно-аппаратных средств МТС с использованием *SDN*& *NFV* и *IMS* технологий при обслуживании *i*-го потока пакетов полезного и служебного трафиков, $i = \overline{1,n}$.

Математическая формулировка задачи создания предлагаемой ММ для оценки показателей качества функционирования МТС на основе концепции *FN* описывается следующими целевыми функциями:

$$W_{КФ} = \mathrm{W}[Arg \max_i(\Pi_{i.пр.}(\lambda_i, H)], \quad i = \overline{1,n}, \tag{2}$$

при следующих ограничениях

$$M_k \le M_{k.доп.},\ E_{i.со.} \ge E_{i.со.доп.},\ \overline{T}_{i.в.пр} \le \overline{T}_{i.в.пр.доп.},\ K_{i.иб.} \le K_{i.иб.доп.},\ i = \overline{1,n}, \tag{3}$$

где M_k – общее число используемых в сетях МТС комплексов программно-аппаратных средств для обслуживания потока пакетов, работающих на основе алгоритма «End to end»; $\overline{T}_{i.в.пр.доп.}$, $M_{k.доп.}$, $E_{i.со.доп.}$ и $K_{i.иб.доп}$ – соответственно среднее время пребывания, число обслуживающих технических комплексов, коэффициент сохранения отказоустойчивости и коэффициент информационной безопасности функционирования программно-аппаратных средств МТС при передаче *i*-го потока пакетов , $i = \overline{1,n}$.

Выражения (2) и (3) определяют сущность рассматриваемого нового подхода с учетом самоподобности полезного и служебного трафиков, на основе которого предлагается ММ анализа показателей качества функционирования МТС с использованием *FN*.

Исследование и оценка показателя отказоустойчивости функционирования МТС на базе архитектурной концепции *FN*

В работе [10] выявлено, что одним из важнейших критериев качества функционирования МТС на базе архитектурной концепции *FN* является коэффициент сохранения отказоустойчивости функционирования системы, определяющий показатели надежности сети связи общего пользования.

На основе исследования [2, 7] установлено, что показатель отказоустойчивости МТС на базе *FN* во многом определяется выбором средств обеспечения надежности активных функциональных блоков, таких как коммутаторов и контроллеров с использованием протоколов OpenFlow сетей SDN, межсетевых экранов, а также определяется функциональной архитектурой подсистемы передачи мультимедийных сообщений IMS, групп сетевых серверов, а также граничных маршрутизаторов. Эти элементы сети являются важными и функциональными частями программно-аппаратных средств сетей МТС.

Рассмотрим один из вариантов оценки надежности МТС, состоящей из M_k групп абонентских и сетевых серверов, каждая из которых обслуживает *i*-е потоки пакетов полезного и служебного трафиков. Оценка надежности сети связи этом случае производится с помощью известного математического аппарата [10]:

$$P_{cc}(\Lambda, t, M_k) = \prod_{i=1}^{n} [P_i(t, \Lambda_i)]^{M_k}, \; i = \overline{1, n}, \tag{4}$$

где $P_i(t, \Lambda_i)$ – вероятность безотказной работы сетей связи с использованием комплекса программно-аппаратных средств.

Выражение (4) характеризует отказоустойчивость функционирования системы с интенсивностью отказов Λ_i узлов коммутации сети МТС.

Учитывая последние предположения, вероятность безотказной работы сетей МТС с использованием M_k групп комплексов программно-аппаратных средств выражается следующим образом:

$$P_{i.\text{ВБР}}(t, \Lambda_i) = \{1 - [1 - \exp(t, \Lambda_i)]^{M_k}\} \le P_{i.\text{доп.}}(t), \quad i = \overline{1, n}, \tag{5}$$

где Λ_i – интенсивность отказов узлов сети (1/с). Вероятность $P_{i.\text{ВБР}}(t, \Lambda_i)$ определяется состояниями входных коммутаторов-контроллеров *SDN*, межсетевых экранов, программных маршрутизаторов *NFV* и подсистем мультимедийных сообщений *IMS*, $i = \overline{1, n}$.

Формула (5) характеризует один из важных показателей – коэффициент сохранения отказоустойчивости программно-аппаратных средств МТС $E_{i.\text{со.}}$, $i = \overline{1, n}$.

На рис. 1 представлена графическая зависимость общей вероятности безотказной работы сетей МТС на базе *FN* от интенсивности отказов узлов программно-аппаратных средств при заданном коэффициенте загрузки системы.

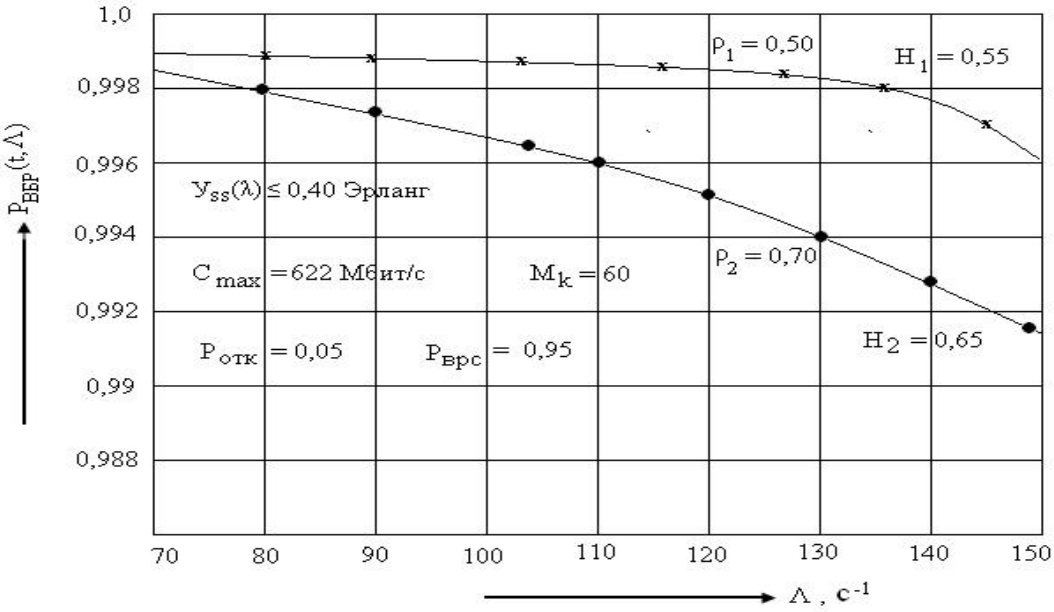


Рис. 1. Графическая зависимость общей вероятности безотказной работы сетей МТС на базе *FN* от интенсивности отказов узлов программно-аппаратных средств

Анализ графической зависимости показывает, что в случае самоподобного трафика $H_1 = 0,55$ и $H_2 = 0,65$ с ростом интенсивности отказов, при интенсивности нагрузки служебного канала $У_{ss}(\lambda) \le 0,40$, вероятности отказа $P_{\text{отк}} = 0,05$, восстановлении работоспособности системы $P_{\text{врс}} = 0,95$ и $C_{\max} = 622$ Мбит/с, вероятность безотказной работы сети МТС значительно уменьшается. Ее заметное изменение начинается со значений $\Lambda \ge 110$ c^{-1} при $C_{\max} = 622$ Мбит/с.

Таким образом, из выражения (7) и анализа приведенных графических зависимостей $P_{\text{ВБР}}(t,\Lambda) = W[H_1, \rho_1, \Lambda, H_2, \rho_2, C_{\max}]$ следует, что увеличение количества комплексов программно-аппаратных средств приводит к улучшению отказоустойчивости функционирования сетей МТС, а тем самым улучшает защиту информации от несанкционированных доступов абонентских и сетевых линий связи в целом.

Анализ и оценка информационной безопасности МТС будущего поколения

В МТС с ростом числа *SDN* & *NFV* и *IMS* технологий потребность в обеспечении информационной безопасности и повышения безопасности передачи полезных и служебных трафиков растет. Одним из потенциальных решений является использование эффективных криптографических методов и методов сетевого кодирования для защиты информации в МТС будущего поколения.

При этом методы криптозащиты каналов связи в МТС не способны полностью защитить от атак *DoS* (Denial of Service) и *DDoS* (Distributed Denial of Service), которые являются инструментом кибератак и киберугрозы информационной безопасности МТС будущего поколения при оказании мультимедийных услуг [2, 5].

Учитывая возможные *DDoS*/*DoS* атаки, коэффициент безопасности функционирования программно-аппаратных средств МТС при обслуживании *i*-го потока пакетов трафиков определяется выражением

$$K_{i.\text{иб.}}(\lambda_i, H_i) = [1 - K_{i.\text{о}}(\lambda_i, H_i)] \le 1 \ , \ i = \overline{1,n}, \tag{6}$$

где $K_{i.\text{о}}(\lambda_i) -$ коэффициент опасности функционирования системы обслуживании *i*-го потока пакетов трафиков с интенсивностью λ_i, $i = \overline{1,n}$.

Выражение (6) позволяет оценить уровень защиты информации от новых угроз информационной безопасности при *DDoS*/*DoS* и кибератаке в МТС, что обеспечивает заданный алгоритм «End to end» и гарантирует приоритизацию обслуживания *i*-го потока пакетов самоподобного трафика.

Исследование среднего времени пребывания потоков пакетов трафика в сети

На основе анализа модели $fBG/G/M_k/N_{\text{бн}}$ выявлено, что одной из ключевых характеристик для оценки производительности сети МТС является среднее время пребывания полезного и служебного трафиков в очереди, может быть определено из решения уравнения Линдли [6, 9].

Учитывая совокупности уравнения Линдли и РК-формулы (Полячека – Хинчина), характеризующие среднее время пребывание *i*-го потока пакетов в *j*-м узле коммутации сетей МТС на базе FN, получаем следующее выражение [2]:

$$E[T_{i.\text{в.пр}}(\lambda, H, N_{\text{бн}} \le N_{\text{бн.доп.}})] = \frac{1}{K_{i.c}} \sum_{j=1}^{M_k} [T_{ij.\text{вых}}(\lambda, H) - T_{ij.\text{вх}}(\lambda, H)], \ \ i = \overline{1,n} \ , \ j = \overline{1,M_k}, \tag{7}$$

где $K_{i.c} -$ коэффициент сжатия трафика *i*-го потока пакетов.

Выражение (7) определяет среднее время пребывание в СМО потоков пакетов полезного и служебного трафиков по сети МТС от момента их поступления в буферный накопитель (БН) входного порта коммутатора $T_{ij.\text{вх}}(\lambda, H)$ с интенсивностью λ до момента прибытия его в граничной БН контроллер $T_{ij.\text{вых}}(\lambda, H)$ выходного порта сети *SDN*.

На рис. 2 представлена графическая зависимость среднего времени пребывание в СМО потоков пакетов трафиков по сети связи от общего числа используемых в сетях МТС комплексов про-

граммно-аппаратных средств при заданной величине коэффициента Херста, $H_i = (0,60,...,0,75)$ и заданной пропускной способности системы.

Анализ графической зависимости $E[T_{\text{в.пр}}(\lambda, H)] = F[\rho_i, M_k, H_i, C_{i.\max}]$ показывает, что использование минимального числа комплексов программно-аппаратных средств и БН $M_k \le (55,...,65)$ способствует минимизации среднего времени пребывания в СМО потоков пакетов трафика при заданной максимальной пропускной способности $C_{i.\max} \le 2,50,...,1,0)$ Гбит/с и коэффициенте загрузки узлов сети МТС $\rho_i = 0,55,...,0,65$, отвечающей требованием отказоустойчивости функционирования и информационной безопасности системы.

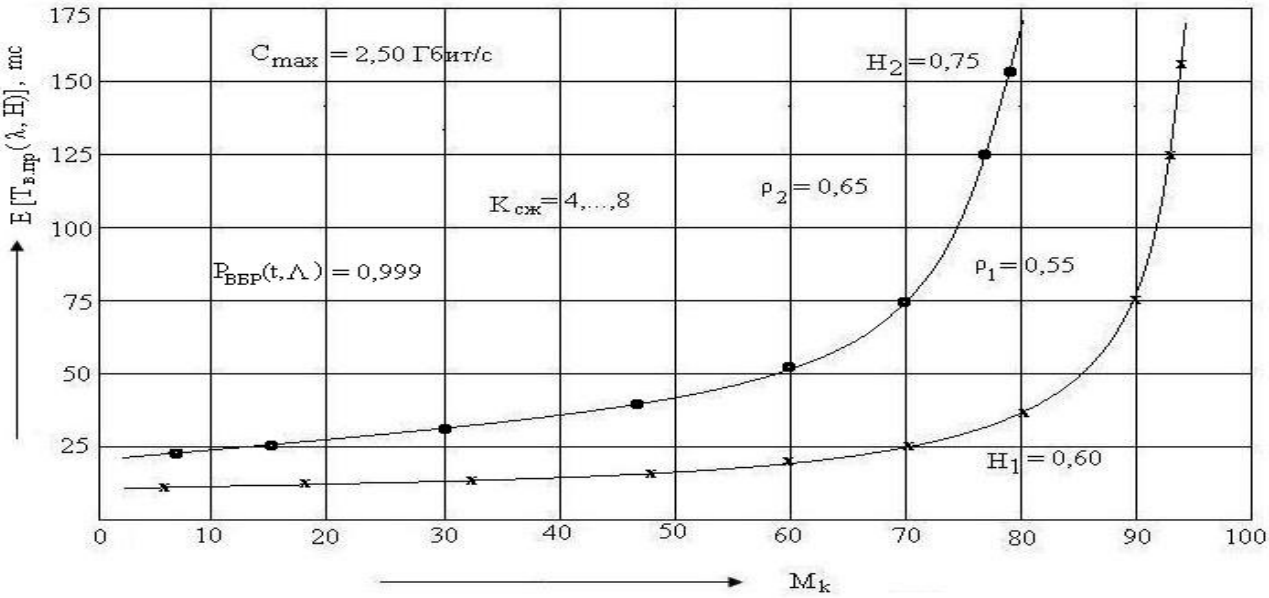


Рис. 2. График зависимости среднего времени пребывания потоков пакетов трафиков в СМО от общего числа комплексов программно-аппаратных средств, используемых в сетях МТС

Таким образом, на основе модели получены аналитические выражения, позволяющие оценить показатели качества функционирования МТС на базе архитектурной концепции *FN* с использованием технологий *SDN*/*NFV* и *IMS* при оказании мультимедийных услуг.

Заключение

1. На основании полученных результатов были проанализированы показатели качества функционирования МТС на базе архитектурной концепции *FN* с использованием технологий *SDN*/*NFV* и IMS при оказании мультимедийных услуг и предложена ММ, учитывающая характер полезных и служебных самоподобных трафиков, а также наличие множества сетевых ресурсов.

2. В результате исследования получены аналитические выражения, которые позволяют оценить показатели отказоустойчивости функционирования, информационной безопасности системы и среднего времени пребывания пакетов трафиков в СМО при оказании услуги «Triple Play services», обеспечивающие гарантированное качество услуг *QoS*, регламентируемых рекомендациями ITU-T серии Q.1541 и Y.3000.

3. На основе анализа модели аналитические выражения и приведенные графические зависимости показали, что наличие самоподобия в полезном и служебном трафике пакетной сети приводит к существенному ухудшению характеристик качества функционирования МТС на базе архитектурной концепции *FN* с использованием технологий *SDN*/*NFV* и *IMS* при оказании мультимедийных услуг.

Библиографический список

1. *Ефимушкин, В. А.* Будущий облик Единой сети электросвязи в Российской Федерации / В. А. Ефимушкин, Ю. М. Козаченко, Т. В. Ледовских, Е. Н. Щербакова // Электросвязь. – 2018. – № 10. – С. 18–27.

2. *Ibrahimov, B. G.* Performance multiservice telecommunication networks based on the architectural concept future networks using SDN technology / B. G. Ibrahimov, R. T. Humbatov, R. F. Ibrahimov // T-Comm, Телекоммуникации и транспорт. – 2018. – Т. 12, № 12. – С. 84–88.
3. *Росляков, А. В.* Будущие сети (Future Networks) / А. В. Росляков, С. В. Ваняшин. – Самара : ПГУТИ, 2015. – 274 с.
4. *Ибрагимов, Б. Г.* Анализ мультисервисных телекоммуникационных сетей связи будущего поколения на базе архитектурной концепции SDN&NFV и IMS / Б. Г. Ибрагимов // Ученые записки АзТУ. – 2018. – № 3. – С. 34–38.
5. *Северцев, Н. А.* Полумарковская модель исследования безопасности систем. Безопасность и надежность системы как объекта, имеющего систему защиты / Н. А. Северцев, А. В. Бецков, Ю. В. Лончаков // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 1(5). – С. 2–8.
6. *Шелухин, О. И.* Моделирования информационных систем / О. И. Шелухин. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2018. – 516 с.
7. *Юрков, Н. К.* К проблеме обеспечения глобальной безопасности / Н. К. Юрков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2012. – Т. 1. – С. 6–7.
8. *Ибрагимов, Б. Г.* Метод расчета показателей функциональной надежности платформы IMS в телекоммуникационных сетях связи / Б. Г. Ибрагимов, Р. Т. Гумбатов, Р. Ф. Ибрагимов, А. М. Исаев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 1. – С. 108–109.
9. *Карташевский, В. Г.* Основы теории массового обслуживания / В. Г. Карташевский. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2013. – 130 с.
10. *Ибрагимов, Б. Г.* Исследование работоспосности подсистемы передачи мультимедийных сообщений в телекоммуникационных сетях связи / Б. Г. Ибрагимов, Я. С. Исаев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2018. – Т. 1. – С. 10–12.

References

1. Efimushkin V. A., Kozachenko Yu. M., Ledovskikh T. V., Shcherbakova E. N. *Elektrosvyaz'* [Telecommunication]. 2018, no. 10, pp. 18 – 27. [In Russian]
2. Ibrahimov B. G., Humbatov R. T., Ibrahimov R. F. *T-Comm, Telekommunikatsii i transport* [T-Comm, telecommunications and transport]. 2018, vol. 12, no. 12, pp. 84–88. [In Russian]
3. Roslyakov A. V., Vanyashin S. V. *Budushchie seti* [*Future Networks*]. Samara: PGUTI, 2015, 274 p. [In Russian]
4. Ibragimov B. G. *Uchenye zapiski AzTU* [Scientific notes of ASTU]. 2018, no. 3, pp. 34–38. [In Russian]
5. Severtsev N. A., Betskov A. V., Lonchakov Yu. V. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2014, no. 1 (5), pp. 2–8. [In Russian]
6. Shelukhin O. I. *Modelirovaniya informatsionnykh sistem* [Modeling of information systems]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2018, 516 p. [In Russian]
7. Yurkov N. K. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2012, vol. 1, pp. 6–7. [In Russian]
8. Ibragimov B. G., Gumbatov R. T., Ibragimov R. F., Isaev A. M. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2018, vol. 1, pp. 108–109. [In Russian]
9. Kartashevskiy V. G. *Osnovy teorii massovogo obsluzhivaniya* [Fundamentals of Queuing theory]. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2013, 130 p. [In Russian]
10. Ibragimov B. G., Isaev Ya. S. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2018, vol. 1, pp. 10–12. [In Russian]

Ибрагимов Байрам Ганимат оглы
доктор технических наук, профессор,
кафедра телекоммуникационных систем
и информационной безопасности,
Азербайджанский технический университет
(Az1073, Азербайджан, г. Баку, пр. Г. Джавида, 25)
E-mail: i.bayram@mail.ru

Гасанов Ариф Гасан оглы
адъюнкт,
Военная академия Вооруженных сил
Азербайджанской Республики,
(Az1065, Азербайджан, г. Баку, Гызыл Шерг, 13)
E-mail: arifhasan2828@yandex.ru

Ibrahimov Bayram Ganimat oglu
doctor of technical sciences, professor,
sub-department of telecommunication systems
and security information,
Azerbaijan Technical University
(Az1073, 25 G. Javid avenue, Baku, Azerbaijan)

Hasanov Arif Hasan oglu
adjunct,
Military Academy of the Armed Forces
of the Republic of Azerbaijan
(Az1065, 13 Gyzyl Sherg, Baku, Azerbaijan)

Алиева Алмаз Али кызы
кандидат технических наук,
и.о. зав. кафедры информационных технологий,
Мингечаурский государственный университет
(Az1148, Азербайджан, г. Баку,
ул. академика Захида Халипова, 23)
E-mail: almaz40@gmail.com

Исаев Ахад Муртуз оглы
адъюнкт,
Военная академия Вооруженных сил
Азербайджанской Республики,
(Az1065, Азербайджан, г. Баку, Гызыл Шерг, 13)
E-mail: axadisayev@mail.ru

Aliyeva Almaz Ali kizi
candidate of technical sciences,
acting head of sub-department
of information technologies,
Mingechaur State University
(Az1148, 23 Academician Zahid Khalipov street,
Baku, Azerbaijan)

Isaev Ahad Murtuz oglu
adjunct,
Military Academy of the Armed Forces
of the Republic of Azerbaijan
(Az1065, 13 Gyzyl Sherg, Baku, Azerbaijan)

УДК 621.396.6
Ибрагимов, Б. Г.
Исследование показателей качества функционирования мультисервисных телекоммуникационных сетей на базе архитектурной концепции будущих сетей / Б. Г. Ибрагимов, А. Г. Гасанов, А. А. Алиева, А. М. Исаев // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 1 (25). – С. 88–95. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-10.

УДК 621.31 DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-11

А. С. Калинцев, Е. А. Рубцов

МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАБОЧЕЙ ОБЛАСТИ СРЕДСТВ АВИАЦИОННОЙ ЦИФРОВОЙ РАДИОСВЯЗИ МЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

A. S. Kalintsev, E. A. Rubtsov

THE METHOD OF CALCULATING THE WORKSPACE AERONAUTICAL DIGITAL RADIO METER RANGE

Аннотация. *Актуальность и цели.* На сегодняшний день в соответствии с глобальным аэронавигационным планом ИКАО на 2016–2030 гг. продолжается внедрение обслуживания по линии передачи данных, и на данном этапе предполагается использование линии передачи данных VDL-2 как основной. Инфраструктура линии передачи данных VDL-2 определяется как основа для внедрения сервисов, в том числе и CPDLC. При расширении зоны обслуживания линии передачи данных следует выполнить анализ основных эксплуатационно-технических характеристик радиотехнических систем связи режима VDL-2. Задача анализа эксплуатационно-технических характеристик приобретает особую актуальность при проектировании новых объектов гражданской авиации в условиях ужесточения требований к безопасности полетов, а также при расширении спектра предоставляемых сервисов и услуг. Целью статьи является разработка методики расчета рабочей области средств авиационной цифровой радиосвязи ОВЧ диапазона. *Результаты и выводы.* Разработана методика расчета рабочей области радиотехнических средств связи, учитывающая параметры зоны действия средств радиосвязи VDL-2 при обеспечении полетов в нижнем воздушном пространстве. Сделан вывод о необходимости применения данной методики для анализа существующих средств авиационной радиосвязи, а также при определении позиций размещения автоматических радиоретрансляторов.

Ключевые слова: безопасность полетов, VDL-2, линия передачи данных, зона действия, рабочая область, нижнее воздушное пространство.

Abstract. Relevance and objectives. At the moment in accordance with the global air navigation plan ICAO for 2016-2030 y., continues implementation of services for data link, and at this stage, the VDL-2 data link is expected to be used as the primary data link. Infrastructure the VDL-2 data link is defined as the basis for the implementation of services, including CPDLC. When expanding the service area of data link, it is necessary to perform the analysis of the main operational and technical characteristics of radio communication systems mode VDL-2. The object of analysis of operational and technical characteristics becomes particularly relevant in the design of new civil aviation facilities, in the context of stiffening safety requirements flight, as well as the expansion of the range of services provided. The purpose of the article is to develop a methodology for calculating the working area of aviation digital radio VHF range. Results and conclusions. The method of calculation of the working area of radio communication means is developed, taking into account the parameters of service area of radio communication VDL-2 when providing flights in the lower airspace. The conclusion is made about the need to use this method for the analysis of existing means of aviation radio, as well as in determining the position of the placement of automatic radio repeaters.

Keywords: flight safety, VDL-2, data link, ground station VDL-2, effective area, work area, lower airspace.

Введение

Использование цифровой радиосвязи позволяет снизить нагрузку на диспетчерский состав повышением степени автоматизации процесса управления воздушным движением (УВД), увеличить ситуационную осведомленность и разгрузить радиоэфир за счет передачи информации в виде стандартных текстовых сообщений CPDLC (controller-pilot data link communications). Эти факторы в конечном итоге положительно сказываются на качестве процесса УВД и уровне безопасности полетов [1].

К достоинствам цифровой радиосвязи, помимо повышения уровня автоматизации процесса УВД, можно отнести возможность применения помехоустойчивого кодирования, рациональное ис-

© Калинцев А. С., Рубцов Е. А., 2019

пользование частотного спектра и возможность использования передатчиков меньшей по сравнению с аналоговыми системами мощности. Одним из видов цифровой радиосвязи в ГА является линия передачи данных (ЛПД) VDL-2 (Very High Frequency Data Link – Mode 2).

Методика расчета рабочей области для линии передачи данных VDL-2

Рабочей областью для цифровой линии передачи данных будем называть объем пространства, в пределах которого обеспечивается требуемое качество связи линии передачи данных. Показателем качества является вероятность приема ошибочного сообщения.

Для передачи информации в ОВЧ диапазоне по линии передачи данных VDL mode 2 используется дифференциальная 8-позиционная фазовая манипуляция D8PSK (Differential 8 Phase Shift Keying) с применением приподнято-косинусоидального формирующего фильтра с $\alpha = 0{,}6$ [2].

Согласно существующим требованиям, при использовании линии передачи данных VDL-2 вероятность неполучения сообщения не должна превышать 10^{-6} [3]. Таким образом, примем, что сообщение, полученное с ошибкой, которую не удалось исправить, будем считать непринятым. Тогда будем считать, что вероятность приема неправильного сообщения не должна превышать 10^{-6}. Максимальный размер кадра режима VDL-2 (по умолчанию) составляет 8312 бит [2].

Вероятность ошибочного приема сообщения при передаче без использования избыточного кодирования определяется по формуле

$$P_{\text{П}} = 1 - \prod_{i=1}^{S} (1 - P_{Ci}), \tag{1}$$

где $P_{\text{П}}$ – вероятность ошибочного приема сообщения; P_{Ci} – вероятность ошибочного приема i-го бита; S – длина пакета.

В работе [3] указано, что в ЛПД VDL-2 при передаче данных используется помехоустойчивое кодирование. Кодирование информации обеспечивается использованием систематического (255, 249) 2^8-кода Рида – Соломона (*RS*) фиксированной длины. Применяемый *RS* (n, k) код позволяет исправлять t символьных ошибок. Корректирующая характеристика *RS* кода (n, k) = (2^m–1, 2^m–1–2t), где m – количество бит на символ определяется в соответствии с формулой минимального расстояния Хэмминга

$$t = \text{int}\left[\frac{d_{\min} - 1}{2}\right] = \text{int}\left[\frac{n-k}{2}\right]. \tag{2}$$

Таким образом, для кода *RS* (255, 249) корректирующая характеристика t = 3 символьных ошибки (24 бита). Следует принять во внимание, что код *RS* применяется для кодирования и восстановления символов, поэтому кодовое слово (КС), имеющее четыре символьные ошибки, не будет восстановлено, т.е. будет принято как ошибочное.

Вероятность приема КС с ошибкой (вероятность ошибочного сообщения ($P_{\text{ОП}}$)) и сообщений без ошибки составляет 1, тогда вероятность приема сообщения с ошибкой может быть найдена

$$P_{\text{ОП}} = 1 - P_{\text{ПП}}. \tag{3}$$

Сообщения, принятые без ошибок и с ошибками, количество которых не превышает t, – правильно принятые сообщения, тогда вероятность приема правильного сообщения можно вычислить по формуле Бернулли. Вероятность ошибочного сообщения найдем по формуле, представленной в работе [4]:

$$P_{\text{ОП}} = 1 - \sum_{i=0}^{t} \left[\binom{i}{n} P_{SE}^{i} (1 - P_{SE})^{n-i} \right], \tag{4}$$

где t – корректирующая характеристика кода *RS*; $\binom{i}{n} = \dfrac{n!}{i!(n-i)}$ – биномиальный коэффициент; P_{SE} – вероятность символьной ошибки.

Вероятность символьной ошибки кода для независимого появления ошибок рассчитывается по формуле

$$P_{SE} = 1 - (1 - P_b)^m, \tag{5}$$

где P_b – *BER* (*bit error ratio*) вероятность ошибок на бит; m – количество бит на символ.

При больших значениях n и малых значениях вероятности P_b формула Бернулли является неудобной и для вычислений используют формулу Пуассона. Формула применима для $p \le 0{,}1$ и $n \cdot p \le 10$. Тогда

$$P_{ОП} = 1 - \sum_{i=0}^{t} \frac{a^m}{m!} e^{-a}, \tag{6}$$

где t – корректирующая характеристика кода *RS*; m – заданное количество ошибок в сообщении; $a = NP_{SE}$ – среднее количество ошибочных символов в КС (N – длина сообщения, P_{SE} – вероятность символьной ошибки (5)).

Учитывая, что коэффициент ошибок на бит (*BER* – bit error rate) – число ошибок на бит выборки, деленное на общее число битов в ней, обычно усредненное по многим таким выборкам [2], вероятность приема ошибочного сообщения определяется, в первую очередь, величиной *BER*.

В соответствии с [2], *BER* для ЛПД VDL режима 2 представляет собой максимальную корректируемую частоту ошибок в битах, равную $1 \cdot 10^{-4}$. Величина *BER* зависит от отношения сигнал/шум и типа используемой модуляции.

Вероятность символьной ошибки на бит при использовании DMPSK находится по формуле [5]

$$P_S \approx 2Q\left(\sqrt{\frac{2E_S}{N_0}} \sin\frac{\pi}{\sqrt{2}M}\right), \tag{7}$$

где $E_S = E_b \log_2 M$ – энергия, приходящаяся на символ; $M = 2^k$ – количество равновероятных символов; $Q(x)$ – гауссов интеграл ошибок.

Гауссов интеграл ошибок может быть определен несколькими способами, его нельзя вычислить в аналитическом виде. Один из видов аппроксимации [5]:

$$Q(x) = \frac{1}{2} erfc\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right), \tag{8}$$

E_b/N_0 – энергетическое отношение сигнал/шум. Отношение является стандартной качественной мерой производительности систем цифровой связи. Отношение E_b/N_0 представляет собой нормированное на ширину полосы и скорость передачи битов отношение *S/N* [6]:

$$\frac{E_b}{N_o} = \frac{ST_b}{N/W} = \frac{S/R}{N/W} = \frac{S}{N}\left(\frac{W}{R}\right), \tag{9}$$

где T_b – время передачи бита; N – мощность шума; R – скорость передачи битов; W – ширина полосы.

Значения скорости передачи битов и ширины полосы ЛПД режима VDL-2 составляют 31 500 бит/с и 25 кГц соответственно.

Приведенные выше формулы верны для канала с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ). Для реальных каналов вероятность будет меньше.

График зависимости *BER* является одной из важнейших характеристик качества систем цифровой связи. Отношение E_b/N_0 является мерой производительности цифровых систем связи и его можно использовать как метрику, с помощью которой можно сравнить качество цифровых систем [6].

На рис. 1 представлены графики зависимости *BER* от E_b/N_0 для различных видов манипуляций, рассчитанные в программе MATLAB.

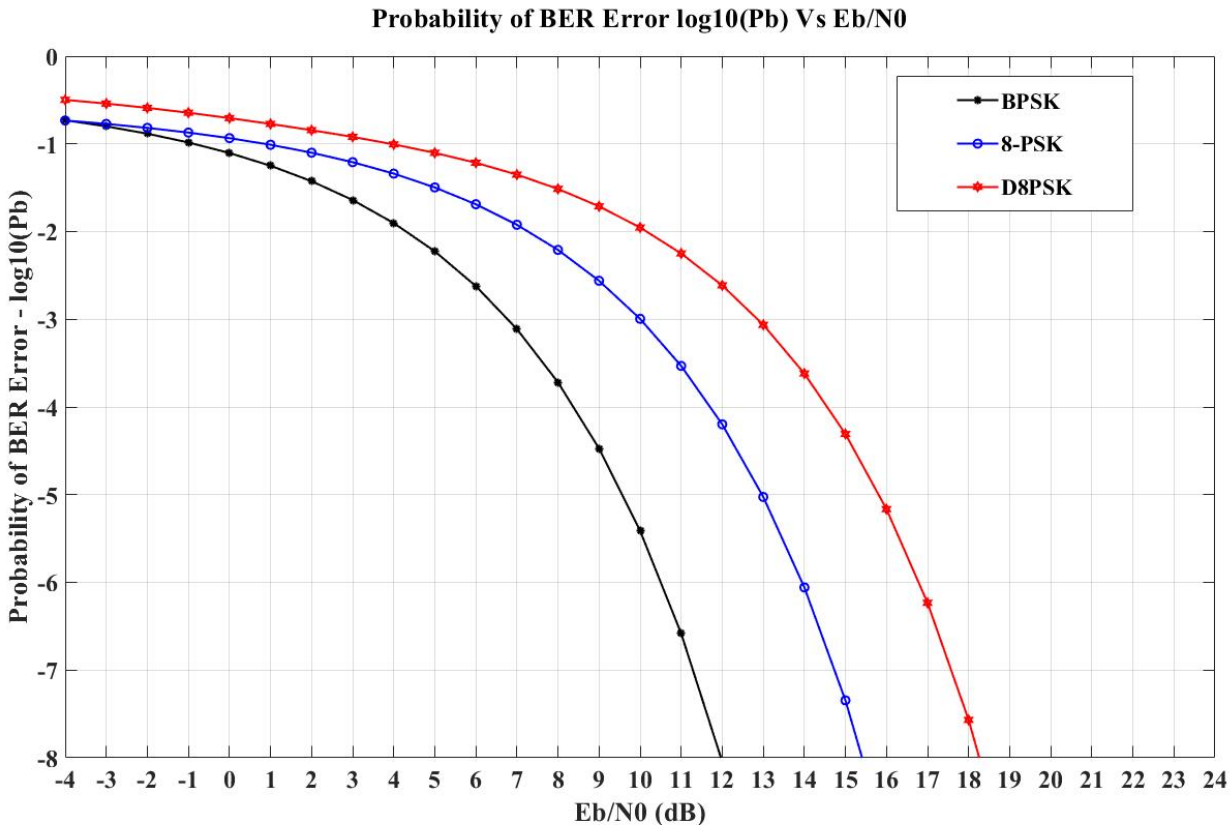


Рис. 1. График зависимости вероятности ошибки на бит от отношения сигнал/шум для разных видов применяемой манипуляции

На рис. 2 приведена схема Simulink-модели D8PSK манипуляции для канала АБГШ для сравнения данных, полученных по аналитическим формулам, с результатами моделирования методом Монте-Карло, выполненная в программе Simulink.

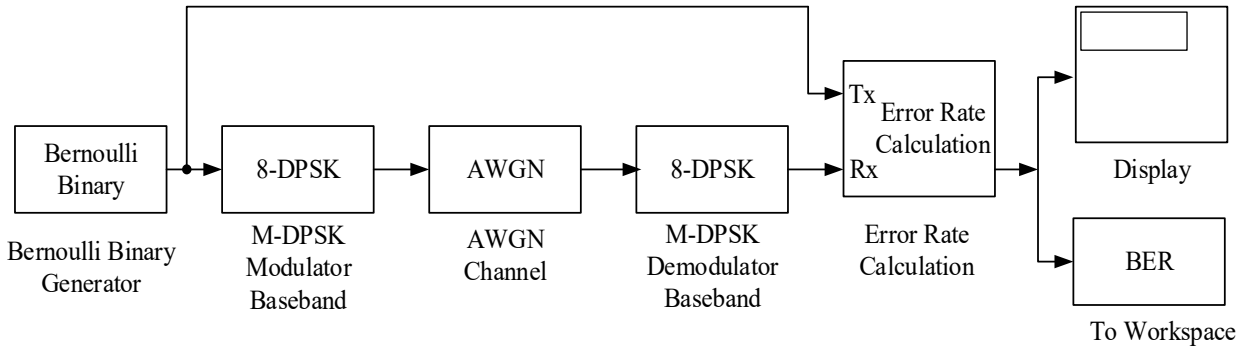


Рис. 2. Схема Simulink-модели D8PSK манипуляции для канала АБГШ

Метод симуляции заключается в переборе заданных отношений С/Ш и фиксации числа битовых ошибок для каждой из манипуляций. Результаты для манипуляций D8PSK представлены на рис. 3, где красная кривая получена при выполнении статистической симуляции, зеленая – с помощью аналитического метода расчета.

Графики, полученные по результатам моделирования и вычислений, демонстрируют достоверность аналитических методов расчета. Для манипуляции D8PSK аналитические значения E_b/N_o при BER = const практически совпадают со значениями, полученными с помощью статистической симуляции методом Монте-Карло и лежат в пределах 90 % уровня доверия (confidence level = 90 %). Для интересующих нас значений $BER = 10^{-4}$ графики полностью совпадают [7].

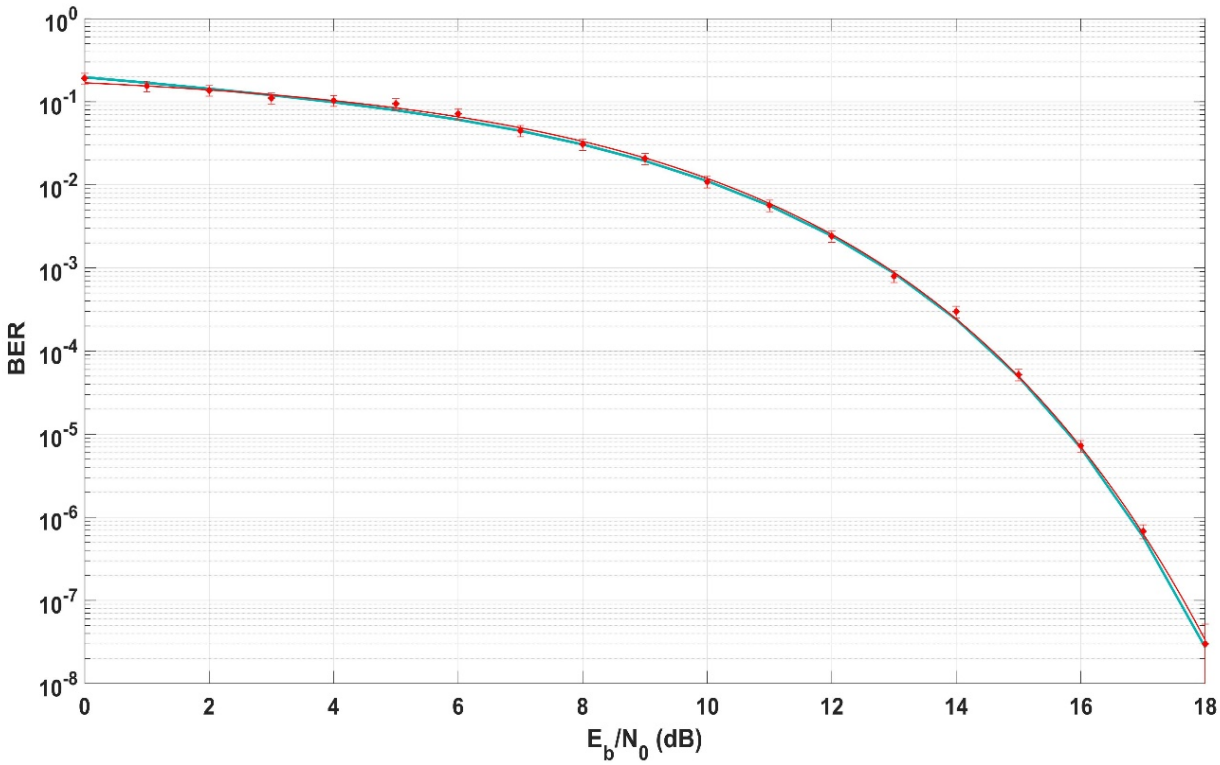


Рис. 3. Графики зависимости *BER* от отношения E_b/N_o для D8PSK манипуляции

При передаче информации большего объема сообщения разбивают на пакеты размером 249 байт (255 – длина блока кода *RS*). Максимальное количество пакетов в одном кадре режима VDL-2 составляет 1039 [2]. Тогда вероятность ошибочного приема сообщения равна

$$P_{\text{ОС}} = 1 - \prod_{i=1}^{N} (1 - P_{\text{П}i}), \tag{9}$$

где $P_{\text{П}i}$ – вероятность неправильного приема одного пакета; N – количество пакетов в одном сообщении.

Расчет рабочей области ЛПД VDL-2 выполняется по следующей методике:

1) рассчитать отношение сигнал/шум для максимального и минимального уровня помехи на различных удалениях;
2) вычислить вероятность ошибки *BER*;
3) определить вероятность ошибки символа P_{es};
4) с учетом помехоустойчивого кодирования, вычислить вероятность неправильного приема сообщения;
5) дальность, для которой эта вероятность составляет 10^{-6}, является границей РО.

Методика расчета рабочей области систем аналоговой радиосвязи

Качественной характеристикой речевой информации является отношение сигнал/шум, полученное на входе приемника. Для определения качества речевой информации выполняют сравнение отношения сигнал/шум на входе приемника со значением, определенным требованиями ИКАО:

$$\gamma_U = \frac{U_{\text{С}}}{U_{\text{Ш}}}. \tag{10}$$

Напряжение сигнала равно произведению напряженности поля в точке приема на действующую длину антенны:

$$U_{\text{С}} = El_{\text{Д}}, \tag{11}$$

В расчетах будем использовать среднюю действующую длину бортовых антенн, равную 0,3 м. Один из способов расчета напряженности поля в точке приема приведен в пункте 3.2 данной работы.

В соответствии с рекомендацией МСЭ-Т Р-372-13 [8] необходимо учитывать внешние и внутренне шумы. Таким образом, напряжение шума складывается из собственных шумов приемника и внешних (атмосферных, промышленных и т.д.) шумов.

Значения собственного шума приемника находят по формуле [9]

$$T_{\text{ПР}} = (K_{\text{ШПР}} - 1)T_0, \tag{12}$$

где $K_{\text{ШПР}}$ – коэффициент шума приемника; $T_0 = 293$ К.

Для определения мощности шума приемника необходимо учесть шумовую температуру антенны ($T_{\text{А}}$).

Мощность шума приемника найдем по формуле

$$P_{\text{Ш_ПРМ}} = k(T_{\text{ПР}} + T_{\text{А}})\Delta F\ , \tag{13}$$

где $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ – постоянная Больцмана; ΔF – ширина полосы пропускания приемника.

На значения мощности атмосферных шумов оказывают влияние такие составляющие, как: регион выполнения полетов, грозовая активность, а также другие факторы. Учесть все переменные составляющие – задача трудоемкая и зачастую невыполнимая. Поэтому при выполнении расчетов следует использовать значения шумов, характерных для зоны выполнения полетов (региона) и частоты.

РО ввиду временной изменчивости многих факторов, а также случайного характера таких изменений, в конечном итоге оказывающих влияние на параметры качества линии передачи информации, не имеет четкой границы. Вместо строгой границы наблюдается некоторый объем пространства, в пределах которого происходит постепенное ухудшение, при движении ВС от РТС связи, параметра качества и его улучшении при движении ВС в сторону РТС связи. Таким образом, для расчета границ РО (максимальной и минимальной РО) будем использовать максимальные и минимальные значения атмосферных и производственных шумов применительно к используемой частоте и региону обслуживания. Значения шумов приведены в рекомендации МСЭ-Т Р.372-13 [8].

Таким образом, напряжение помехи можно найти по формуле

$$U_{\text{П}} = \sqrt{P_{\Sigma\text{Ш}} R}\ , \tag{14}$$

где $P_{\sum \text{Ш}} = P_{\text{Ш_ПРМ}} + P_{\text{Ш_атм}}$ – общий уровень шума, состоящий из собственных шумов приемника, атмосферных и промышленных шумов.

По рассчитанному напряжению помехи и по кривой потерь на распространение определяют значения отношения сигнал/шум для различных расстояний.

Расчет напряженности поля и напряжения в точке приема

На данном этапе задача сводится к необходимости определить напряжение сигнала на входе приемника. Для этого следует найти значения напряженности поля в точке приема. Из теории распространения радиоволн известно соотношение мощности и напряженности поля для свободного пространства в точке приема [10]:

$$E_{\text{св}} = \frac{\sqrt{30 P_{\text{пер}} G_1}}{r}, \tag{15}$$

где P – мощность передатчика в Вт; G_1 – усиление антенны по мощности в разах в заданном направлении, берется из диаграммы направленности антенны; D – расстояние от антенны в метрах.

Единицы измерения величин, применяемых в формуле (14), являются не очень удобными при выполнении расчетов. Преобразованная для практического применения формула имеет вид [10]

$$E_{\text{св}} = \frac{173\sqrt{P_{1[\text{кВт}]} G_1}}{r_{[\text{км}]}}. \tag{16}$$

В реальных условиях распространения радиоволн поверхность и среда распространения радиоволн оказывают значительное влияние на уровень сигнала в точке приема. Учет влияния различных факторов осуществляется с помощью множителя ослабления (V), который показывает, во сколько напряженность поля сигнала в реальных условиях меньше напряженности поля при распространении сигнала в свободном пространстве

$$E = E_{\text{св}} V. \tag{17}$$

Основные потери передачи находятся по формуле

$$L_R = L_0 - V, \tag{18}$$

где L_0 – потери распространения в свободном пространстве; V – множитель ослабления, дБ.

Тогда

$$V = L_0 - L_R. \tag{19}$$

В рекомендации МСЭ-R P.528-3 [12] представлены кривые основных потерь для различных удалений. Значения ослабления мощности сигнала в реальных условиях и для свободного пространства можно определить из табличных значений, приведенных в рекомендации. Подставив значения в формулу (17), найдем множитель ослабления.

Для всех удалений по формуле (14) выполним расчет значения напряженности поля сигнала при распространении в свободном пространстве. Значение напряженности в точке приема равно произведению напряженности поля в точке приема при распространении в свободном пространстве и множителя ослабления.

Значения напряжения сигнала в точке приема находят как произведение действующей длины антенны ВС и напряженности поля сигнала в точке приема.

Расчет рабочей области наземной станции VDL mode 2

При выполнении расчета границ РО для высоты полета 1000 м примем, что первая граница РО определена для условий действия в районе максимальных по уровню индустриальных и атмосферных помех, вторая граница РО определена для условий действия минимальных по уровню помех, характерных для района расположения наземной станции. В соответствии с рекомендацией МСЭ-Т P.372-13 [8] были определены максимальное и минимальное значения коэффициента шума, которые составили 53 и 14 дБ соответственно. Для интересующих нас удалений по формуле (14) выполнен расчет напряженности поля в точке приема для свободного пространства, а также найдено значение множителя ослабления с использованием табличных данных рекомендации МСЭ-Т P.528-3 [11]. Расчет отношения сигнал/шум и энергетического отношения сигнал/шум (5) выполнен для ширины полосы 25 кГц и на интересующих нас удалениях. С использованием программы MATLAB определены значения *BER* и рассчитан радиус рабочей области линии передачи данных VDL-2. Результаты расчета для максимальной и минимальной помехи сведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

Результаты расчета РО при максимальных значениях помехи

Удаление, км	E_b/N_0, дБ	*BER*	P_{SE}	$P_{\text{оп}}$	$P_{\text{ош.кадра}}$
78	15,62	$1{,}52 \cdot 10^{-5}$	$1{,}22 \cdot 10^{-4}$	$3{,}79 \cdot 10^{-8}$	$3{,}94 \cdot 10^{-5}$
80	15,50	$1{,}94 \cdot 10^{-5}$	$1{,}55 \cdot 10^{-4}$	$9{,}81 \cdot 10^{-8}$	$1{,}02 \cdot 10^{-4}$
83	14,98	$5{,}10 \cdot 10^{-5}$	$4{,}08 \cdot 10^{-4}$	$4{,}48 \cdot 10^{-6}$	$4{,}64 \cdot 10^{-3}$
85	14,58	$1{,}00 \cdot 10^{-4}$	$7{,}99 \cdot 10^{-4}$	$6{,}12 \cdot 10^{-5}$	$6{,}16 \cdot 10^{-2}$
88	13,47	$4{,}91 \cdot 10^{-4}$	$3{,}92 \cdot 10^{-3}$	0,019	1,0
90	12,78	$1{,}10 \cdot 10^{-3}$	$8{,}77 \cdot 10^{-3}$	0,188	1,0
93	11,50	$3{,}80 \cdot 10^{-3}$	0,030	0,946	1,0

Таблица 2

Результаты расчета РО при минимальных значениях помехи

Удаление, км	E_b/N_0, дБ	*BER*	P_{SE}	$P_{оп}$	$P_{ош.кадра}$
165	16,40	$2{,}73 \cdot 10^{-6}$	$2{,}18 \cdot 10^{-5}$	$3{,}96 \cdot 10^{-11}$	$4{,}12 \cdot 10^{-8}$
166	15,55	$1{,}75 \cdot 10^{-5}$	$1{,}40 \cdot 10^{-4}$	$6{,}62 \cdot 10^{-8}$	$6{,}88 \cdot 10^{-5}$
167	15,01	$4{,}83 \cdot 10^{-5}$	$3{,}87 \cdot 10^{-4}$	$3{,}64 \cdot 10^{-6}$	$3{,}77 \cdot 10^{-3}$
170	13,35	$5{,}70 \cdot 10^{-4}$	$4{,}55 \cdot 10^{-3}$	0,030	1,0
173	11,60	$4{,}50 \cdot 10^{-3}$	0,035	0,979	1,0
175	10,30	$9{,}20 \cdot 10^{-3}$	0,071	1,000	1,0

Радиус рабочей области для блока информации размером 249 байт при воздействии максимальной помехи составил 83 км. Для минимальных значений помехи при передаче блока информации размером 249 байт радиус рабочей области составил 167 км.

По результатам расчетов границы РО наземной станции VDL-2 представлены на рис. 5 кривые *A* и *C*. Расчет зоны действия РТС ОВЧ диапазона с учетом углов закрытия выполнен в работе [12]. Границы зоны действия нанесены на карту нижнего воздушного пространства зоны Мезень КДП МВЛ – рис. 4, кривая *B*.

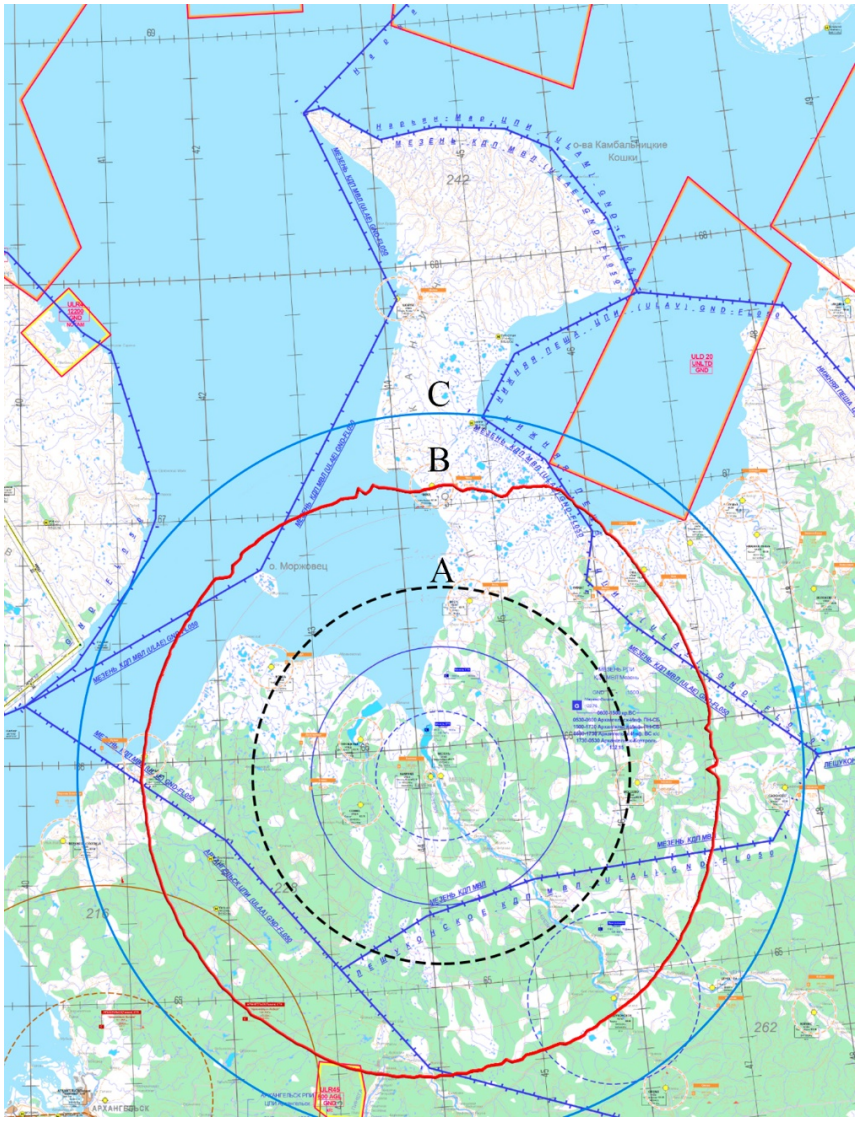


Рис. 4. Границы рабочей области и зона действия наземной станции VDL-2:
A – граница РО при воздействии максимальной помехи; *C* – граница РО при воздействии минимальной помехи; *B* – зона действия наземной станции VDL-2 с учетом углов закрытия

Для высоты полета 1000 м граница рабочей области находится в пределах окружностей *A* и *C*, представленных на рис. 4. В области, ограниченной окружностью *A*, при воздействии максимальной помехи требования ИКАО к линиям передачи данных выполняются. Таким образом, качество передачи данных в этой области можно считать гарантированно высоким.

Рабочая область наземной станции ограничена зоной действия, таким образом, границами РО являются кривая *B* и окружность *A*. При движении *BC* от центра рабочей области возможно снижение качества передачи данных в пределах допустимого, в зоне от окружности *A* до границы зоны действия (кривая *B*).

Библиографический список

1. Глобальный аэронавигационный план на 2016–2030 гг. Doc. 9750-AN/963. – Монреаль, 2018. – 151с.
2. Руководство по ОВЧ-линии цифровой связи (VDL) режима 2. Doc 9776-AN/970. – Монреаль, 2015. – 174 с.
3. Руководство по применению линий передачи данных в целях обслуживания воздушного движения. Doc 9694-AN/995. – Монреаль, 1999. – 217 с.
4. AHA Products Group (AHA) of Comtech Telecommunications Corporation AHA. Application Note Primer: Reed-Solomon Error Correction Codes (ECC). ANRS01_0404. – URL: https://www.eeweb.com/app-notes/download/2394
5. *Прокис, Дж.* Цифровая связь : пер. с англ. / Дж. Прокис. – Москва : Радио и связь, 2000. – 800 с.
6. *Скляр, Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – Москва : Вильямс, 2003. – 1104 с.
7. *Harjotkaur, A. V.* BER performance analysis of M-ary DPSK techniques using simulation modelling / A. V. Harjotkaur // International Journal of Electrical and Electronics Engineering Research (IJEEER). – 2013. – Vol. 3, iss. 2. – P. 93–100.
8. Рекомендация МСЭ-R P.372-13. Радиошум. – ITU, Женева, 2017. – 79 с.
9. *Рубцов, Е. А.* Разработка и реализация методов расчета эксплуатационных характеристик средств радиотехнического обеспечения полетов : дис. … канд. техн. наук / Рубцов Е. А. – Санкт-Петербург, 2015. – 167 с.
10. *Долуханов, М. П.* Распространение радиоволн / М. П. Долуханов. – Москва : Связь, 1972. – 336 с.
11. Рекомендация МСЭ-R P.528-3. Кривые распространения радиоволн для воздушной подвижной и радионавигационной служб, работающих в диапазонах ОВЧ, УВЧ и СВЧ. – ITU, Женева, 2013. – 51 с.
12. *Калинцев, А. С.* Анализ зоны действия средств авиационной подвижной радиосвязи ОВЧ-диапазона аэродрома Мезень / А. С. Калинцев // Гражданская авиация: XXI век : сб. материалов X Междунар. науч. конф. (5–6 апреля 2018 г.). – Ульяновск : УИ ГА, 2018. – С. 52–54.

References

1. *Global'nyy aeronavigatsionnyy plan na 2016–2030 gg. Doc. 9750-AN/963* [Global air navigation plan for 2016-2030 Doc. 9750-AN/963]. Monreal, 2018, 151p. [In Russian]
2. *Rukovodstvo po OVCh-linii tsifrovoy svyazi (VDL) rezhima 2. Doc 9776-AN/970* [VHF digital link guide (VDL) mode 2. Doc 9776 AN/970]. Monreal, 2015, 174 p. [In Russian]
3. *Rukovodstvo po primeneniyu liniy peredachi dannykh v tselyakh obsluzhivaniya vozdushnogo dvizheniya. Doc 9694-AN/995* [Guidance on the use of data lines for air traffic services. Doc 9694-AN/995]. Monreal, 1999, 217 p. [In Russian]
4. *AHA Products Group (AHA) of Comtech Telecommunications Corporation AHA. Application Note Primer: Reed-Solomon Error Correction Codes (ECC). ANRS01_0404*. Available at: https://www.eeweb.com/app-notes/download/2394
5. Prokis Dzh. *Tsifrovaya svyaz': per. s angl.* [Digital communication : translation from english]. Moscow: Radio i svyaz', 2000, 800 p. [In Russian]
6. Sklyar B. *Tsifrovaya svyaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie* [Digital communication. Theoretical basis and practical application]. Moscow: Vil'yams, 2003, 1104 p. [In Russian]
7. Harjotkaur A. V. *International Journal of Electrical and Electronics Engineering Research (IJEEER)*. 2013, vol. 3, iss. 2, pp. 93–100.
8. *Rekomendatsiya MSE-R P.372-13. Radioshum* [Recommendation ITU-R P. 372-13. Radionoise]. ITU, Zheneva, 2017, 79 p. [In Russian]
9. Rubtsov E. A. *Razrabotka i realizatsiya metodov rascheta ekspluatatsionnykh kharakteristik sredstv radiotekhnicheskogo obespecheniya poletov: dis. kand. tekhn. nauk* [Development and implementation of methods for calculating the performance of means of radio support of flights : dis. ... cand. techn. sciences]. Saint-Petersburg, 2015, 167 p. [In Russian]
10. Dolukhanov M. P. *Rasprostranenie radiovoln* [Propagation]. Moscow: Svyaz', 1972, 336 p. [In Russian]

11. *Rekomendatsiya MSE-R P.528-3. Krivye rasprostraneniya radiovoln dlya vozdushnoy podvizhnoy i radionavigatsionnoy sluzhb, rabotayushchikh v diapazonakh OVCh, UVCh i SVCh* [Recommendation ITU-R P. 528-3. Radio wave propagation curves for air mobile and radio navigation services operating in the VHF, UHF and microwave bands]. ITU, Zheneva, 2013, 51 p. [In Russian]
12. Kalintsev A. S. *Grazhdanskaya aviatsiya: XXI vek: sb. materialov X Mezhdunar. nauch. konf. (5–6 aprelya 2018 g.)* [Civil aviation: XXI century : sat. materials X international. science. Conf. (5-6 April 2018)]. Ulyanovsk: UI GA, 2018, pp. 52–54. [In Russian]

Калинцев Андрей Сергеевич
техник по радиолокации, радионавигации и связи (объекта КДП) службы ЭРТОС,
аэродром «Васьково» подразделение
на п/п «Мезень» Архангельский Центр ОВД
Филиал «Аэронавигации Северо-запада»
ФГУП госкорпорация ОрВД
(163045, г. Архангельск, ул. Ломоносова, 86/
Выучейского, 23);
ОТЭНС-1716, магистрант
Санкт-Петербургский государственный
университет гражданской авиации
(196210, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38)
E-mail: Kas4job@gmail.com

Рубцов Евгений Андреевич
кандидат технических наук, доцент,
кафедра радиоэлектронных систем,
Санкт-Петербургский государственный
университет гражданской авиации
(196210, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Пилотов, 38)
E-mail: Rubtsov.spb.guga@rambler.ru

Kalintsev Andrey Sergeevich
radar, radio navigation and communication technician (KDP object) of the ERTOS service of the Vaskovo airfield, subdivision at the Mezen station
(163045, 86 Lomonosov street /
23 Vyucheyskogo street, Arkhangelsk, Russia)
OTENS-1716, master degree student,
St. Petersburg State University of Civil Aviation
(196210, 38 Pilotov street, St. Petersburg, Russia)

Rubtsov Evgeniy Andreevich
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of electronic systems,
St. Petersburg State University of Civil Aviation
(196210, 38 Pilotov street, St. Petersburg, Russia)

УДК 621.31
Калинцев, А. С.
Методика расчета рабочей области средств авиационной цифровой радиосвязи ОВЧ диапазона / А. С. Калинцев, Е. А. Рубцов // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 1 (25). – С. 96–105. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-11.

ОРГАНИЗАЦИЯ И БЕЗОПАСНОСТЬ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ

ORGANIZATION AND SAFETY OF ROAD TRAFFIC

УДК 656.25 (2Р37) + 06 DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-12

О. И. Веревкина

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ГИБРИДНОГО МЕТОДА ОЦЕНКИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ РИСКОВ НАРУШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА РЕГИОНАЛЬНОМ И ЛИНЕЙНОМ УРОВНЯХ В ХОЗЯЙСТВЕ ПУТИ

O. I. Verevkina

THE RESULTS OF APPLYING THE HYBRID METHOD TO ASSESS FUNCTIONAL RISKS OF INFRINGEMENT OF SAFETY OF TRAFFIC ON THE REGIONAL AND LINEAR LEVELS ON THE FARM PATH

Аннотация. *Актуальность и цели.* Развитие гибридного метода оценки рисков (далее гибридный метод) в направлении учета динамики факторов в краткосрочной перспективе (от квартала до года), адаптация гибридного метода к применению на линейных предприятиях ОАО «РЖД», уточнение спектра входных данных для расчета обусловливает актуальность данной работы. *Материалы и методы*. Проводится анализ сезонных колебаний, регрессионный анализ временных рядов, общий логико-вероятностный метод, метод деревьев событий, теория ошибок человека-оператора, матрица риска. *Результаты*. Собраны данные и произведена факторная оценка рисков безопасности движения поездов на уровне линейных предприятий Северо-Кавказской железной дороги. Сформулированы меры по снижению риска индивидуально для каждого предприятия, сформулированы предложения по видоизменению списка входных данных, необходимых для расчета. *Выводы*. Разработанные изменения позволяют производить оценку рисков в ближайшей перспективе, разрабатывать мероприятия по снижению риска с учетом объемов мер по управлению инфраструктурой, обычно применяемых в путевом хозяйстве, в том числе относящихся к «капитальным» затратам, что позволит решать задачи оптимизации мер управления и сочетания «капитальные» – «текущие» затраты.

Abstract. *Background*. Development of a hybrid method of risk assessment (hereinafter hybrid method) in the direction of accounting for the dynamics of factors in the short term (from quarter to year), adaptation of the hybrid method to use in the linear enterprises of JSC "Russian Railways", specification of the range of input data for the calculation. *Materials and methods*. Analysis of seasonal fluctuations, regression analysis of time series, olvm, the method of event trees, the theory of error-of the human operator, the matrix of risk. *Results*. Data were collected and factor assessment of train safety risks at the level of line enterprises of the North Caucasus railway was carried out. Risk reduction measures are formulated individually for each enterprise, proposals for modifying the list of input data necessary for the calculation are formulated. *Conclusions*. The developed changes make it possible to assess risks in the short term, to develop measures to reduce risk, taking into account the volume of measures about infrastructure management, usually used in the track economy, including those related to "capital" costs, which will solve the problem of optimizing management measures and the combination of "capital" – "current" costs.

© Веревкина О. И., 2019

Ключевые слова: инфраструктура, анализ, гибридный метод, деревья событий, оценка рисков, регрессионный анализ временных рядов, оценка параметров, допустимый риск, прогноз, вероятность, корректирующие мероприятия.

Keywords: infrastructure, analysis, hybrid method, event trees, risk assessment, regression analysis of time series, assessment of parameters of acceptable risk, forecast, probability, corrective measures.

Результаты факторного анализа, в ряде случаев проводимого по величине отельного фактора, дают основание руководству дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД» для оценки деятельности линейных предприятий в области безопасности движения [1–6].

Однако на текущий момент руководство блока безопасности движения ЦДИ ОАО «РЖД» заинтересовано в более детальном и глубоком разборе и прогнозе существующих тонких мест, поскольку имеющийся анализ не совсем соответствует новым целям и задачам, фиксирует только текущую картину и не дает возможности прогноза для своевременного устранения рисков нарушений безопасности движения (НБД) поездов [7–8].

В связи с этим в 2016 г. под руководством ЦРБ и ЦДИ ОАО «РЖД» была разработана Методика оценки функциональных рисков в путевом комплексе, в которой риски по факторам оцениваются по вероятности возникновения нарушения безопасности движения и риску, связанному с этим (а не по величине отдельных факторов) [1]. На основе этой разработки предложен гибридный метод оценки рисков, результаты применения которого изложены в данной статье [5, 6].

Факторный анализ выполнялся на основе гибридного метода на базе региональной Дирекции инфраструктуры (Северо-Кавказской).

Проведенный факторный анализ отличается от стандартного анализа следующим:

1) оценка риска производится не по величине отдельного опасного фактора, а по уровню риска, формируемого на основе учета состояния большей части основных факторов и сравнения этого риска с допустимым уровнем, определяемым стратегией гарантированного обеспечения безопасности движения;

2) анализ позволяет среди всего спектра мер выбрать меры, наиболее эффективно влияющие на снижение рисков возникновения НБД;

3) более объективной оценкой состояния безопасности на ПЧ по сравнению с анализом отдельного фактора;

4) возможностью своевременно формировать меры по устранению возникающих угроз НБД.

Виды нарушений безопасности движения, для которых рассчитывались риски

В табл. 1 представлены виды нарушений безопасности движения, вошедшие в реестр рисков, в соответствии с [9].

Таблица 1

Виды нарушений безопасности движения, вошедшие в реестр рисков, в соответствии с «методикой идентификации рисков»

Укрупненные названия групп рисков	Номер по реестру рисков	Название рисков согласно реестра
1	2	3
Внутренние/ основные виды рисков	1	Затопление, пожар, нарушение целостности конструкций
	2	Столкновения подвижного состава с другим подвижным составом, сход подвижного состава при поездной работе
	3	Столкновения подвижного состава с другим подвижным составом, сход подвижного состава при маневровой работе
	4	Излом рельса под железнодорожным подвижным составом
	5	Наезд железнодорожного подвижного состава на механизмы, оборудование и посторонние объекты
	6	Неограждение сигналами опасного места для движения поездов при производстве работ
	7	Неисправности пути, в результате которых допущена задержка поезда на перегоне или станции на 1 ч и более
	8	Неисправность пути, потребовавшая выдачи приказа о закрытии или ограничения скорости движения поездов до 15 км/ч

Окончание табл. 1

1	2	3
Особые виды рисков	2.1	Столкновения и сходы железнодорожного подвижного состава, загруженного опасными грузами
	2.2	Столкновения и сходы подвижного состава в пассажирских поездах
	2.3	Сходы железнодорожного подвижного состава, допущенные перед искусственными сооружениями

В исследовании рассчитывались риски 2–4, 2.1–2.3.

Факторы, учитываемые в расчете

Виды факторов риска, учитываемые при проведенной оценке рисков [7], представлены в табл. 2.

Таблица 2

Виды факторов

Укрупненные названия групп факторов	Название факторов	№ фактора в таблице классификатора
Дефектность рельсового хозяйства	Количество дефектных рельсов, лежащих в пути на 1 тыс. км главного пути	2.1
	Количество контроленепригодных рельсов на 1 тыс. км главного пути	2.2
	Количество рельсов со сверхнорм. боковым износом	2.3
	Количество дефектных металлических элементов стрелочного перевода	2.4
Отступления в содержании ВСП	Протяженность пути с неудовлетворительной балловой оценкой, км	3.1
	Количество фактов уширения колеи более допустимого	3.2
	Количество фактов сужения рельсовой колеи более допустимого	3.3
	Количество отступлений рельсовой колеи по уровню	3.4
	Количество отступлений рельсовой колеи в плане	3.5
	Количество просадок	3.6
	Количество неисправностей пути III, IV ст. на 1 тыс. км	3.7
	Кол-во повторов неисправностей пути III, IV степени на 1 тыс. км пути	3.8
	Протяженность участков пути с сверхнормативной наработкой на 1 тыс. км главного пути	3.9
Недостатки подготовки и квалификации персонала	Неукомплектованность штата монтеров пути	8.1
	Неукомплектованность штата бригадиров пути	8.2
	Неукомплектованность штата дорожных мастеров	8.3
	Неукомплектованность штата операторов дефектоскопных тележек	8.4
	Неукомплектованность штата расшифровщиков дефектограмм, %	8.5
	Текучесть кадров рабочих профессий	8.6
	Доля работников со стажем работы в должности менее 1 года	8.7
Уровень материально-технического обеспечения	Необеспеченность инструментом и средствами малой механизации	9.1
	Неукомплектованность ПКЗ, %	9.2
	Невыполнение плана поставки материально-технических ресурсов, %	9.3
	Необеспеченность средствами измерения параметров пути и стрелочных переводов	9.4

Для проведения оценки рисков, связанных со сходом подвижного состава в организованных поездах, использованы данные по 25 факторам (из 42, влияющих на риск схода) с проведением анализа данных за 3 года – с 2014 по 2016 г.

Для оценки рисков применена технология гибридного метода [5, 6] на основе общего логико-вероятностного метода [3, 4], последовательность расчета представлена в работе [1].

В качестве примера на рис. 1 представлен фрагмент «дерева событий» развития фактора риска «отклонение в геометрии рельсовой колеи 3, 4 степени».

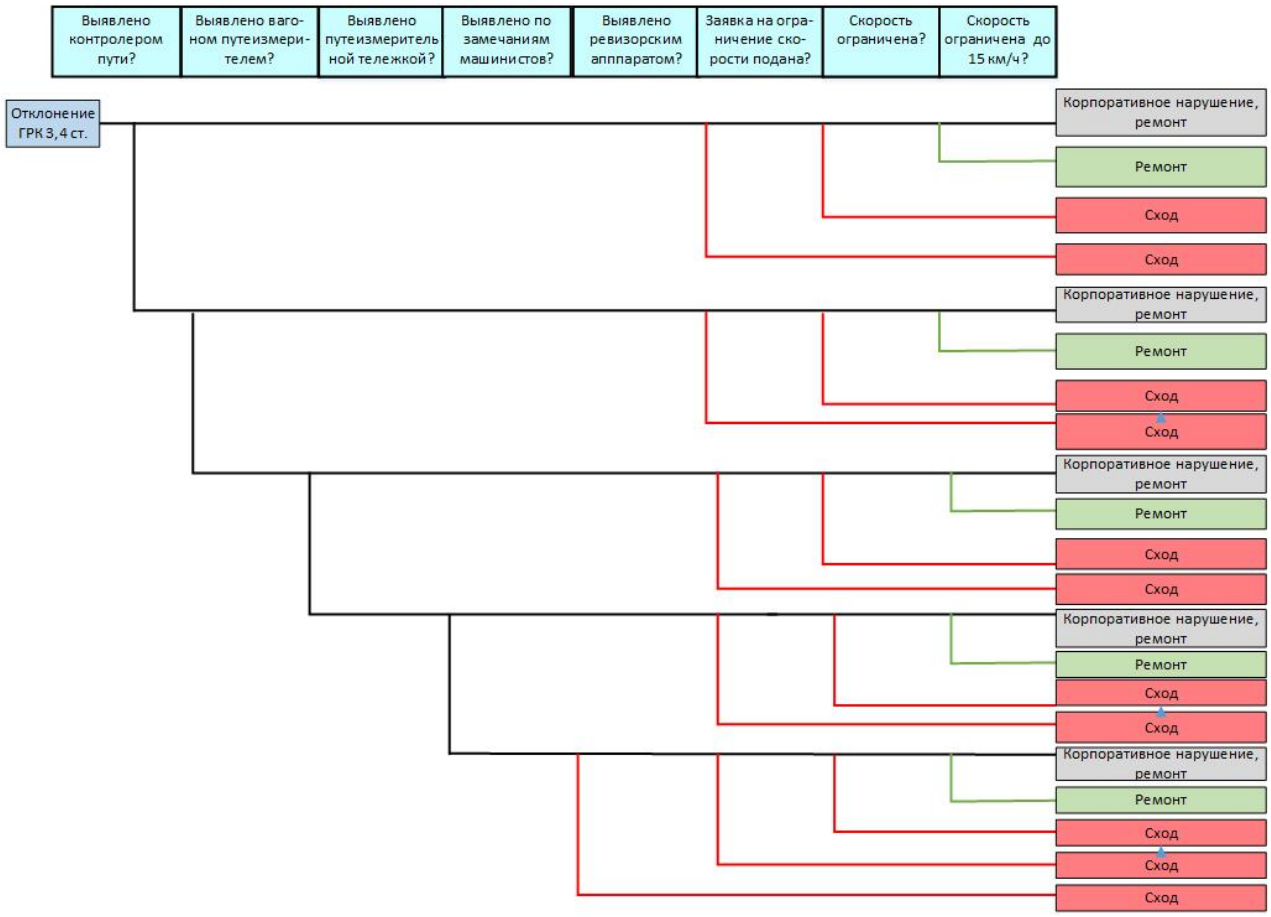


Рис. 1. Дерево событий развития фактора риска «отклонение в геометрии рельсовой колеи 3, 4 степени». Горизонтальная линия из точки ветвления соответствует «да», вертикальная вниз – «нет»

Для каждого риска по основным техническим факторам построены полные деревья событий и функции риска [10–14].

Пример функции риска «Столкновения подвижного состава с другим подвижным составом, сход подвижного состава при поездной работе» представлен ниже, формулы (1–7):

$$R_2 = \sum_{j=1}^{4} \lambda_{2j} p_{2j} W_2 , \tag{1}$$

где R_2 – риск схода при поездной работе; λ_{2j} – интенсивность первичных факторов риска вида j; p_{2j} – вероятность превращения первичного фактора в сход; W_2 – среднее значение ущерба от схода в поезде.

Прогноз интенсивности развития первичных факторов рассчитывается по формуле

$$\lambda_{21}(X) = b_0 + b_1 x. \tag{2}$$

Для оценки параметров взята выборка из табл. 1 (x_i, λ_i) за 2013–2014 гг.

Параметры b_0, b_1 определяются на основе метода наименьших квадратов:

$$b_1 = \frac{\overline{x\lambda} - \overline{x}\,\overline{\lambda}}{\overline{x^2} - \overline{x}^2}; \tag{3}$$

$$b_0 = \overline{\lambda} - b_1 \overline{x}, \tag{4}$$

где

$$\overline{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i; \tag{5}$$

$$\overline{\lambda} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\lambda_i; \tag{6}$$

$$\overline{x\lambda} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i\lambda_i. \tag{7}$$

Предварительно значения $x_т$ рассчитываются по модели, задаваемой формулой

$$x_т = a + bt + c_i\,\delta_{ij} + u_t + e_t, \tag{8}$$

где $x_т$ – значения ряда в момент t; a, b – коэффициенты линейного тренда; t – время (номер квартала); c_i – коэффициенты сезонных отклонений; $\delta_{ij} = 1$, если $I = j$, $\delta_{ij} = 0$, если $I \neq j$, (9)

$$u_t = \pm\, 30L_t, \tag{10}$$

L_t – убыль (прирост) количеств километров ремонтируемых в квартале t (t = 1, 2, 3, 4) по сравнению с предыдущим годом; e_t – случайная компонента.

Коэффициенты a, b, c_1, c_2, c_3, c_4 вычисляются методом наименьших квадратов по следующим формулам [13, 14]:

$$b = \frac{\overline{tx} - \overline{t}\,\overline{x}}{\overline{t^2} - \overline{t}^2}; \tag{11}$$

$$a = \overline{y} - b\overline{t}\ , \tag{12}$$

где

$$\overline{t} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}t_i\ ; \tag{13}$$

$$\overline{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i\ , \tag{14}$$

$$\overline{ty} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}t_i x_i\ , \tag{15}$$

i – целочисленный индекс (от 1 до n):

$$c_i = \frac{\sum_{k=1}^{n}(y_{k=i(\mathrm{mod}\,4)} - \hat{y}_{k=i(\mathrm{mod}\,4)})}{m}, \tag{16}$$

где m – количество циклов (в данном случае лет); $k = i(\mathrm{mod}\ 4)$ – равенство k и i по модулю 4 (т.е выбираются значения однотипных сезонов); $y_к$ – значение временного ряда в точке k-й квартал (t_k); $\hat{y}_k$ – значение линейного тренда в точке k-й квартал (t_k).

Модель учитывает изменение объема управляющих воздействий в различные периоды времени по сравнению с предыдущим аналогичным сезоном (компонента u_t).

Формулы расчета p_{21} , а также вкладов факторов риска:

$$p_{21}(x_1, x_2, \ldots\ldots x_{25}) = k_{н0}f_1(x_1, x_2, \ldots x_{25}) + k_{н2}f_2(x_{12}, x_{13}, \ldots\ldots, x_{19}); \tag{17}$$

$$f_1(x_1, x_2, x_3, \ldots, x_{25}) = (1-x_1x_2x_3)(1-x_{20}x_{21}x_{22})(1-x_{23}x_{24}x_{25})(1-x_{10})(1-x_{11}); \tag{18}$$

$$f_2(x_{12}, x_{13}, \ldots, x_{19}) = (1-x_{12}x_{13}x_{14})(1-x_{15}x_{16}x_{17})(1-x_{17}x_{18}x_{19}), \tag{19}$$

где $f_1(x_1, x_2,\ldots, x_{25})$ – функция вероятности схода по причине невыявляемости и неведения несрабатывания ограничительных мер); $f_2(x_{12}, \ldots, x_{19})$ – функция вероятности схода по причине нарушения технологии ремонта (своевременность и качество ремонта);

$$k_{н0} = 1; \tag{20}$$

$$k_{н2} = (\delta_3 / \delta_1) * (f_1(x_1, \ldots, x_{11}) / f_2(x_{12}, \ldots, x_{18})), \quad (21)$$

где $\delta_1, \delta_3, \delta_4$ – доли подфакторов (в табл. 27 прил. 5 Методики [1]).

Расчет вкладов в риск по факторам производится по формуле (15)

$$F_j = ((p_{21}(x_{1,0}, \ldots, x_{j,0}, \ldots, x_{17,0}) - p_{21}(x_{1,0}, \ldots, 1, \ldots, x_{17,0}))W_2. \quad (22)$$

Везде выше x_i – переменные ($0 \le x_i \le 1$), отражающие степень развития факторов, $x_{i,0}$ – конкретные значения этих переменных.

Значения переменных присваиваются в соответствии с конкретными производственными данными линейного предприятия.

Суммарный учет риска по причине «человеческого фактора» производился суммированием результатов для отдельных технических факторов, поскольку функционирование верхнего строения пути осуществляется на данный момент одной структурой – линейным предприятием, на нем же лежит и ответственность за безопасное его функционирование [15, 16].

Формирование данных для расчета по ПЧ

Пример того, как группируются для расчета входные данные, представлен в табл. 3.

Таблица 3

Входные данные для расчета рисков и факторного анализа по ПЧ-1

Год	Дефектность рельсового хозяйства			Отступления в содержании ВСП				Отклонения от норм содержания бесстыкового пути		Персонал						Факторы внешней среды			
	Количество дефектных рельсов, лежащих в главном пути	Количество остродефектных рельсов, лежащих в главном пути	Количество дефектных металлических элементов стрелочного перевода	Протяженность пути с неудовлетворительной балловой оценкой, км	Количество неисправностей пути III, IV ст. на 100 км	Количество повторов неисправностей пути III, IV ст. на 100 км пути	Протяженность участков пути с сверхнормативной наработкой	Количество мест временного восстановления плетей бесстыкового пути на 100 км главного пути	Количество пар плетей вне оптимальной температуры закрепления	Неукомплектованность штата монтеров пути	Неукомплектованность штата бригадиров пути	Неукомплектованность штата дорожных мастеров	Неукомплектованность штата операторов дефектоскопных тележек	Текучесть кадров рабочих профессий,%	Доля работников со стажем работы в должности менее 1 года,%	Необеспеченность инструментом и средствами малой механизации	Неукомплектованность ПКЗ, %	Невыполнение плана поставки материально-технических ресурсов, %	Необеспеченность средствами измерения параметров пути и стрелочных переводов,%
2014	96	32	2	6	47	16	66,0	40	40	98	97	100	100	1,4	1,4	13	100	70	86
2015	84	67	1	7	99	33	68,0	64,5	64,5	98	100	100	100	3,2	3,2	13	100	70	86
2016	110	31	0	9	120	40	70,0	104	104	100	100	100	100	0,0	0,0	13	100	70	86
2017	98,8	27,3	0	7	127	42	72,4	89,5	116	86	89	81	78	1,0	1,0	13	100	70	86

Результаты расчетов

В результате проведенных расчетов получена оценка уровня влияния каждого из 25 факторов риска, выраженная в величине потенциальных финансовых потерь (тыс. рублей в год) от влияния факторов на 6 рисков из реестра (см. табл. 1):

1) столкновения подвижного состава с другим подвижным составом, сход подвижного состава при поездной работе (№ 2);

2) столкновения подвижного состава с другим подвижным составом, сход подвижного состава при маневровой работе (№ 3);

3) излом рельса под железнодорожным подвижным составом (№ 4);

4) столкновения и сходы железнодорожного подвижного состава, загруженного опасными грузами (№ 2.1);

5) столкновения и сходы подвижного состава в пассажирских поездах (№ 2.2);

6) сходы железнодорожного подвижного состава, допущенные перед искусственными сооружениями (№ 2.3).

Результаты расчетов вкладов факторов в риск содержатся в табл. 4.

Оценка рейтинга дистанций пути произведена в данном случае по **«уровню риска» R_2** – «Столкновения подвижного состава с другим подвижным составом, сход подвижного состава при поездной работе» (см. табл. 1).

Результаты расчетов сведены в табл. 5, а уровень риска дополнительно обозначен в цветовой гамме.

Оценка значимости рисков и влияние факторов

Значимость рисков и влияния факторов оценивалась с помощью матриц риска [13, 14] и представлена на рис. 2

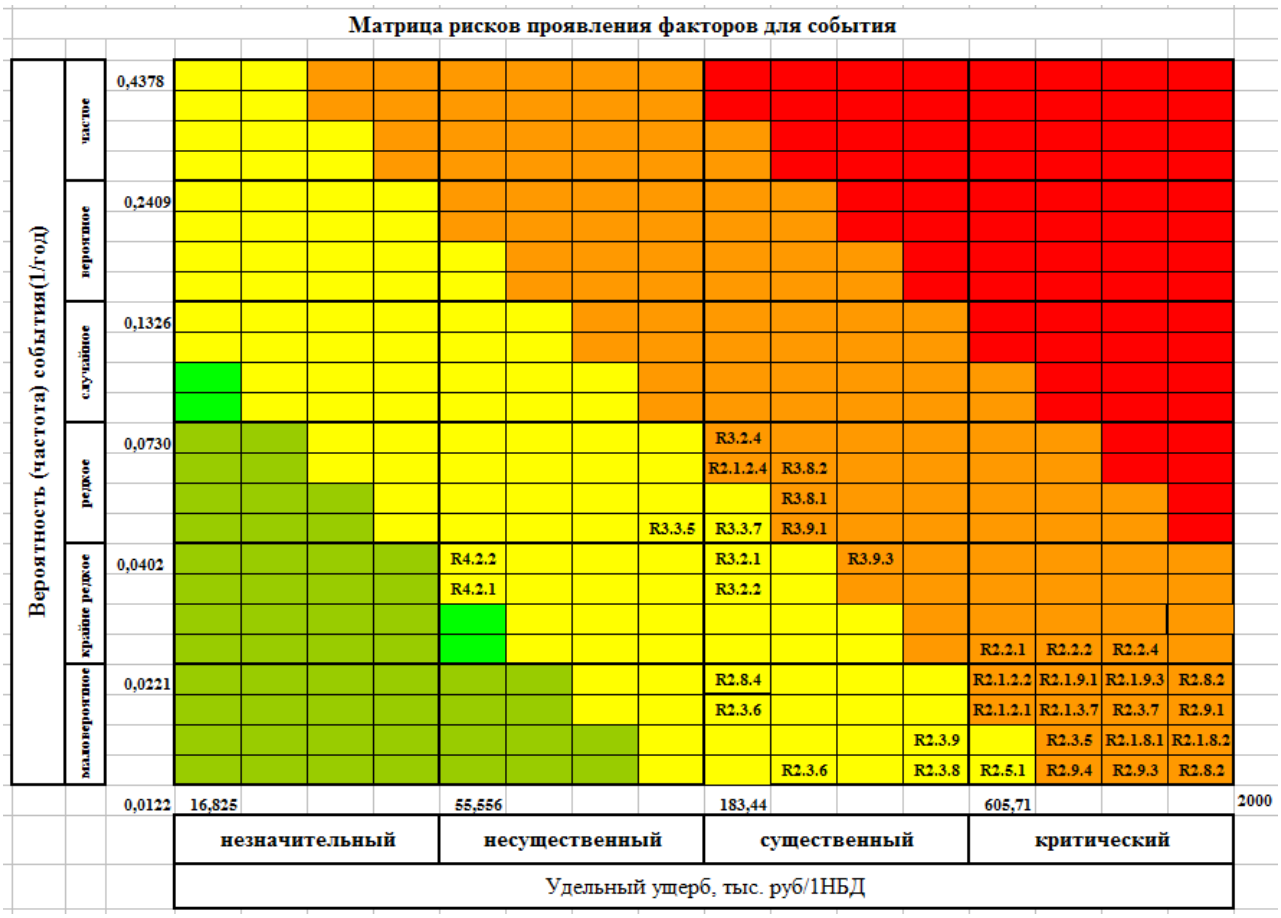


Рис. 2. Матрица рисков ПЧ-1 проявления факторов для события «столкновение, сход в поездной работе»: *** – $R_{1,2,3}$ – номер фактора в таблице классификатора рисков [3] (*1* – (первое значение индекса) – код риска в реестре; *2*, *3* – (последующие значения) номер фактора в табл. 2)

Таблица 4

Итоговая таблица, рассчитанная по факторам риска «сход в поездной работе» (Ростовский регион управления)

Объекты	Верхнее строение пути													Бесстыковой путь		Стрелочные переводы	Персонал						Факторы внешней среды				Общий уровень риска R_2
Основные факторы	2				3									4		5	8						9				
	Дефектность рельсового хозяйства				Отступления в содержании ВСП									Отступления в содержании		Отступления в содержании	Недостатки подготовки и квалификации персонала						Уровень материально-технического обеспечения				
Показатели, определяющие степень развития факторов	Количество дефектных рельсов, лежащих в пути на 100 . км главного пути	Количество контроленепригодных рельсов на 100 км главного пути	Количество рельсов со сверхнормативным боковым износом	Количество дефектных металлических элементов стрелочного перевода	Протяженность пути с неудовлетворительной балловой оценкой, км	Количество фактов уширения колеи более допустимого	Количество фактов сужения рельсовой колеи более допустимого	Количество отступлений рельсовой колеи по уровню	Количество отступлений рельсовой колеи в плане	Количество просадок	Количество неисправностей пути III, IV ст. на 100 км	Кол-во повторов неисправностей пути III, IV степени на 100 км пути	Протяженность участков пути с сверхнормат. наработкой на 100км главного пути	Количество мест временного восстановления плетей бесстыкового пути на 100 км гл. пути	Количество пар плетей вне оптимальной температуры закрепления	Количество повторно выявленных замечаний	Неукомплектованность штата монтеров пути	Неукомплектованность штата бригадиров пути	Неукомплектованность штата дорожных мастеров	Неукомплектованность штата операторов дефектоскопных тележек	Текучесть кадров рабочих профессий	Доля работников со стажем работы в должности менее 1 года	Необеспеченность инструментом и средствами малой механизации	Неукомплектованность ПКЗ, %	Невыполнение плана поставки материально-технических ресурсов, %	Необеспеченность средствами измерения параметров пути и стрелочных переводов	
№ ПЧ	2.1	2.2	2.3	2.4	3	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	4.1	4.2	5.1	8.1	8.2	8.3	8.4	8.6	8.7	9.1	9.2	9.3	9.4	
ПЧ-1	15,71	15,71	1,40	28,24	2,67	0,75	0,19	0,56	16,06	4,98	20,73	5,18	7,88	0,33	3,27	6,91	21,52	20,79	2,83	4,71	0,00	0,00	21,93	0,00	19,37	9,63	88,80
ПЧ-3	1,69	1,69	0,60	0,38	0,47	0,31	0,08	0,24	6,76	0,55	8,73	2,18	0,47	0,64	1,93	0,15	6,41	0,00	0,00	0,00	6,38	2,13	2,95	0,00	2,72	4,14	16,6
ПЧ-4	11,83	11,83	0,80	0,60	12,40	2,85	0,71	2,13	68,29	4,98	81,80	1,90	14,10	3,10	14,80	21,4	32,00	28,67	0,00	0,00	55,82	24,22	28,77	0,00	25,18	42,80	146,7
ПЧ-26	8,83	8,83	0,70	10,96	0,83	0,31	0,08	0,24	6,76	0,55	11,52	2,88	0,23	0,19	1,93	2,88	27,93	20,79	2,83	0,00	20,51	6,84	4,48	3,59	6,24	6,89	44,95
ПЧ-27	188,3	188,3	18,83	0,73	1,69	3,37	0,84	2,53	72,53	4,98	93,61	23,40	1,16	2,40	11,99	23,4	18,19	22,98	0,00	150,2	247,8	82,60	69,60	73,41	69,67	18,20	482,1
ПЧ-33	18,63	18,63	1,86	3,72	0,02	0,01	0,00	0,00	0,11	0,01	0,14	0,05	0,00	0,11	1,14	1,24	11,31	0,00	0,00	29,82	11,31	3,77	3,84	0,89	4,67	0,00	42,26
ПЧ-35	37,73	37,73	3,77	17,32	0,951	6,35	1,59	4,76	136,5	11,11	176,1	44,03	70,45	0,74	7,42	4,33	26,57	4,19	5,95	45,96	100,02	33,34	43,39	0,00	42,51	15,28	276,3

недопустимый	нежелательный	допустимый	не принимаемый в расчет

По рассчитанным данным сформулированы меры по корректировке риска.

На рис. 3 представлена диаграмма по уровню риска на дистанциях пути СКДИ.

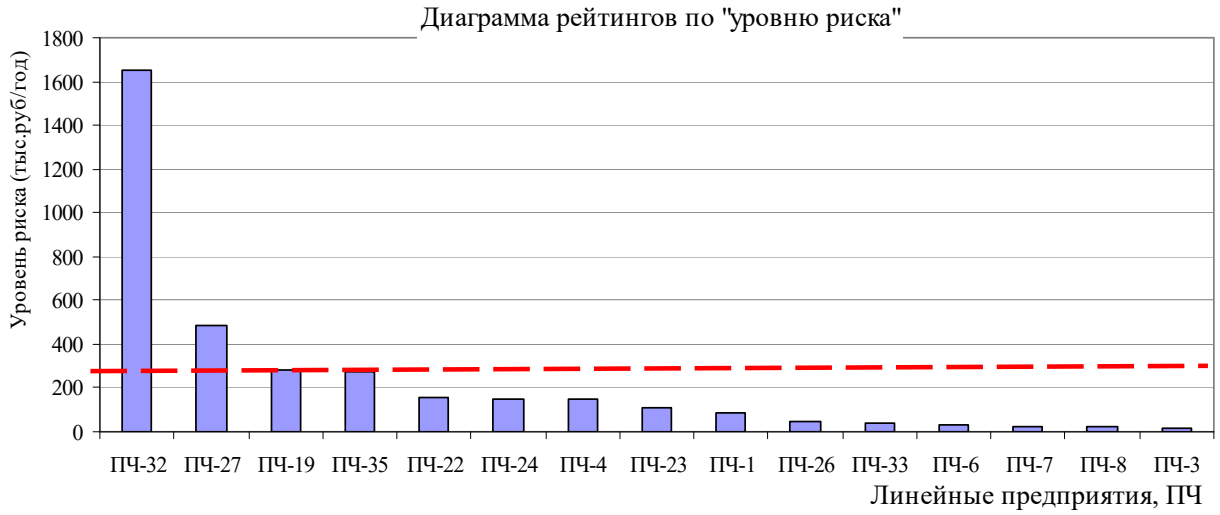


Рис. 3. Диаграмма рейтингов линейных предприятий по уровню риска

В зоне уровня «недопустимый» в порядке убывания риска находятся:

1) ПЧ-32;
2) ПЧ-27;
3) ПЧ-19;
4) ПЧ-35;
5) ПЧ-22;
6) ПЧ-24;
7) ПЧ-4.

Формирование мероприятий по корректировке риска

По результатам расчетов сформированы мероприятия по уменьшению риска на этих дистанциях до уровня «нежелательный».

Пример таких мероприятий по снижению риска на ПЧ-1 – «Шахтинская» представлен в табл. 5.

Данные по факторам, вклад которых в риск находится в зоне «Нежелательный», приведены в табл. 4.

Таблица 5

Корректирующие мероприятия по снижению риска на ПЧ-1 – «Шахтинская»

Название фактора	Мера по снижению риска до допустимого значения
Количество дефектных металлических элементов стрелочного перевода	Отремонтировать (заменить) дефектные детали на 40 стрелочных переводах
Необеспеченность инструментом и средствами малой механизации	Добиться увеличения укомплектованности инструментом и средствами малой механизации до уровня 98 %
Неукомплектованность штата монтеров пути	Укомплектовать штат до 100 %
Неукомплектованность штата бригадиров пути	Укомплектовать штат до 100 %
Количество неисправностей пути III, IV ст. на 100 км. Количество отступлений рельсовой колеи в плане	Сохранить объемы применения планово-предупредительной выправки пути на уровне 2017 г.
Невыполнение плана поставки материально-технических ресурсов, %	Увеличить % выполнения плана поставки МТР до 85 %

Заключение

Разработанная методика оценки функциональных рисков для хозяйства пути позволяет проводить факторный анализ, отличающийся от стандартного целым рядом преимуществ:

1. Оценка риска производится не по величине отдельного опасного фактора, а по уровню риска, формируемого на основе учета состояния большей части основных факторов и сравнения этого риска с допустимым уровнем, определяемым стратегией гарантированного обеспечения безопасности движения.

2. Анализ позволяет среди всего спектра мер выбрать меры, наиболее эффективно влияющие на снижение рисков возникновения НБД.

3. Повышается объективность оценки состояния безопасности на ПЧ по сравнению с анализом отдельного фактора.

4. Появляется возможность своевременно формировать меры по устранению возникающих угроз НБД.

Одновременно выявился ряд недостатков в системе сбора информации, применяемой для оценки рисков:

1. Для объективного прогноза интенсивностей факторов технического плана необходим не только временной анализ рядов, но и мер, направленных на улучшение состояния инфраструктуры. Необходим учет управляющих воздействий в рамках работ по текущему содержанию пути и планово-предупредительному ремонту верхнего строения пути.

2. По данным учета «человеческого фактора», для более точной оценки рисков по данному фактору необходимо, чтобы данные предоставлялись не по текучести, а по распределению персонала по стажу работы в категориях.

Указанные недостатки предполагается устранять по мере развития нормативной документации по управлению рисками в хозяйстве пути и сооружений, а также дальнейшего применения гибридного метода на линейном, региональном и центральных уровнях.

Библиографический список

1. Методика идентификации рисков в области функциональной безопасности движения поездов на инфраструктуре ООО «РЖД» для управления пути и сооружений (распоряжение ОАО «РЖД» № 4246р от 01.12.2016 г. № 4246р). – Москва, 2016.
2. *Можаев, А. С.* современное состояние и некоторые направления логико-вероятностных методов анализа систем. Часть I / А. С. Можаев // Теория и информационная технология моделирования безопасности сложных систем. Вып. 1 / под ред. И. А. Рябинина. Препринт 101. – Санкт-Петербург : ИПМАШ РАН, 1994. – С. 23–53.
3. *Можаев, А. С.* Общий логико-вероятностный метод анализа надежности сложных систем / А. С. Можаев. – Ленинград : ВМА им. Гречко, 2000. – 68 с.
4. *Рябинин, И. А.* Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем / И. А. Рябинин, Г. Н.Черкасов. – Москва : Радио и связь, 1981. – 248 с.
5. *Веревкина, О. И.* О системе оценки рисков в области функциональной безопасности движения поездов // Мир Транспорта. – 2017. – Т. 15, № 6 (73). – С. 206–221.
6. *Веревкина, О. И.* О гибридном методе прогнозирования рисков на железнодорожном транспорте на основании общего логико-вероятностного метода // Известия Петербургского университета путей сообщения. – 2017. – Т. 14, № 4. – С. 615–627.
7. *Безродный, Б. Ф.* Оптимизация процесса менеджмента качества при изготовлении релейной продукции на Камышловском электротехническом заводе / Б. Ф. Безродный, Е. А. Михеев // Надежность и качество сложных систем. – 2015. – № 2 (10). – С. 63–73.
8. Методика определения статистической оценки текущего состояния систем и устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / А. В. Горелик, Б. Ф. Безродный, П. А. Неваров, Д. Н. Болотский, А. С. Веселова, А. С Голубев // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. – 2015. – Т. 2. – С. 169–172.
9. Методические рекомендации по оценке рисков на железнодорожной инфраструктуре ОАО «РЖД» (разработчик НИИАС, утв. 21.11.2011). – Москва, 2011. – 104 с.
10. Методика оценки рисков в области функциональной безопасности движения на инфраструктуре ОАО «РЖД». – Москва : ОАО «РЖД», 2016. – 72 с.

11. ГОСТ Р 54505–2011. Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте. – Москва : Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2011. – 34 с.
12. Методика нормирования и оценки риска транспортных происшествий и иных событий, связанных с нарушениями правил безопасности движения и эксплуатации железнодорожного транспорта. – Москва : ОАО «РЖД», 2016. – 60 с.
13. Национальный стандарт стандарта Российской Федерации ГОСТ Р ИСО 31000–2010 «Менеджмент риска. Принципы и руководство». Утвержден приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 21 декабря 2010 г. № 883-ст. – Москва, 2010.
14. ГОСТ Р МЭК 62502-2014 Менеджмент риска. Анализ дерева событий. – 14. ГОСТ Р 54505–2011 «Безопасность функциональная. Управление рисками на железнодорожном транспорте». – Москва : Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2015. – 30 с.
15. Методические рекомендации по построению матрицы рисков (распоряжение ОАО «РЖД» № 1946р от 22.09.2016). – Москва, 2016.
16. СТО РЖД 02.041-2011. Управление ресурсами, рисками и надежностью на этапах жизненного цикла (УРРАН). Системы, устройства и оборудование путевого хозяйства. Требования надежности и функциональной безопасности. – Москва, 2011.

References

1. *Metodika identifikatsii riskov v oblasti funktsional'noy bezopasnosti dvizheniya poezdov na infrastrukture OOO «RZhD» dlya upravleniya puti i sooruzheniy (rasporyazhenie OAO «RZhD» № 4246r ot 01.12.2016 g. № 4246r)* [A method of identifying risks in the field of functional safety of movement of trains on the infrastructure of JSC "RZD" Department of ways and structures (order of JSC "RZD" № 4246p from 01.12.2016, No. 4246p).]. Moscow, 2016. [In Russian]
2. Mozhaev A. S. *Teoriya i informatsionnaya tekhnologiya modelirovaniya bezopasnosti slozhnykh sistem. Vyp. 1* [Theory and information technology of security modeling of complex systems. Issue 1]. Preprint 101. Saint-Petersburg: IPMASh RAN, 1994, pp. 23–53. [In Russian]
3. Mozhaev A. S. *Obshchiy logiko-veroyatnostnyy metod analiza nadezhnosti slozhnykh sistem* [General logical-probabilistic method of reliability analysis of complex systems]. Leningrad: VMA im. Grechko, 2000, 68 p. [In Russian]
4. Ryabinin I. A., Cherkasov G. N. *Logiko-veroyatnostnye metody issledovaniya nadezhnosti strukturno-slozhnykh sistem* [Logical-probabilistic methods of studying the reliability of structurally complex systems]. Moscow: Radio i svyaz', 1981, 248 p. [In Russian]
5. Verevkina O. I. *Mir Transporta* [The World Of Transport]. 2017, vol. 15, no. 6 (73), pp. 206–221. [In Russian]
6. Verevkina O. I. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [News of St. Petersburg University of railway engineering]. 2017, vol. 14, no. 4, pp. 615–627. [In Russian]
7. Bezrodnyy B. F., Mikheev E. A. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* [Reliability and quality of complex systems]. 2015, no. 2 (10), pp. 63–73. [In Russian]
8. Gorelik A. V., Bezrodnyy B. F., Nevarov P. A., Bolotskiy D. N., Veselova A. S., Golubev A. S. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo* [Proceedings of the International Symposium Reliability and quality]. 2015, vol. 2, pp. 169–172. [In Russian]
9. *Metodicheskie rekomendatsii po otsenke riskov na zheleznodorozhnoy infrastrukture OAO «RZhD» (razrabotchik NIIAS, utv. 21.11.2011)* [Methodological recommendations for risk assessment on the railway infrastructure of JSC "Russian Railways" (developed by NIIASS, app. 21.11.2011)]. Moscow, 2011, 104 p. [In Russian]
10. *Metodika otsenki riskov v oblasti funktsional'noy bezopasnosti dvizheniya na infrastrukture OAO «RZhD»* [Risk assessment methodology in the field of functional traffic safety on the infrastructure of JSC "Russian Railways"]. Moscow: OAO «RZhD», 2016, 72 p. [In Russian]
11. GOST R 54505–2011. *Bezopasnost' funktsional'naya. Upravlenie riskami na zheleznodorozhnom transporte»* [GOST R 54505-2011. Safety functional. Railway risk management]. Moscow: Federal'noe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii, 2011, 34 p. [In Russian]
12. *Metodika normirovaniya i otsenki riska transportnykh proisshestviy i inykh sobytiy, svyazannykh s narusheniyami pravil bezopasnosti dvizheniya i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo transporta* [Methods of regulation and risk assessment of accidents and other events related to violations of traffic safety rules and operation of railway transport]. Moscow: OAO «RZhD», 2016, 60 p. [In Russian]
13. *Natsional'nyy standart standarta Rossiyskoy Federatsii GOST R ISO 31000–2010 «Menedzhment riska. Printsipy i rukovodstvo». Utverzhden prikazom Federal'nogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 21 dekabrya 2010 g. № 883-st.* [National standard of the Russian Federation GOST R ISO 31000-2010 "Risk Management. Principles and guidance". Approved by the order of the Federal Agency for technical regulation and Metrology of December 21, 2010 № 883-st]. Moscow, 2010. [In Russian]

14. GOST R MEK 62502-2014 *Menedzhment riska. Analiz dereva sobytiy. 14. GOST R 54505–2011 «Bezopasnost' funktsional'naya. Upravlenie riskami na zheleznodorozhnom transporte»* [GOST R IEC 62502-2014 risk Management. Event tree analysis. – 14. GOST R 54505-2011 "functional Safety. Railway risk management»]. Moscow: Federal'noe agentstvo po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii, 2015, 30 p. [In Russian]
15. *Metodicheskie rekomendatsii po postroeniyu matritsy riskov (rasporyazhenie OAO «RZhD» № 1946r ot 22.09.2016)* [Guidelines for building a risk matrix (the order of JSC "RZD" № 1946p from 22.09.2016)]. Moscow, 2016. [In Russian]
16. *STO RZhD 02.041-2011. Upravlenie resursami, riskami i nadezhnost'yu na etapakh zhiznennogo tsikla (URRAN). Sistemy, ustroystva i oborudovanie putevogo khozyaystva. Trebovaniya nadezhnosti i funktsional'noy bezopasnosti* [STO RZD 02.041-2011. Resource, risk and reliability management in the life cycle (URRAN). Systems, devices and equipment of track facilities. Reliability and functional safety requirements]. Moscow, 2011. [In Russian]

Веревкина Ольга Ивановна
кандидат технических наук, доцент,
кафедра управления эксплуатационной работой,
Ростовский государственный университет путей сообщения
(344038, Россия, г. Ростов-на-Дону,
пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2)
E-mail: ov18111966@mail.ru

Verevkina Olga Ivanovna
candidate of technical sciences, associate professor,
sub-department of management of operational work,
Rostov State Transport University
(344038, 2 square of the Rostov Infantry Regiment of the National Militia, Rostov-on-Don, Russia)

УДК 656.25 (2Р37) + 06
Веревкина, О. И.
Результаты применения гибридного метода оценки функциональных рисков нарушения безопасности движения на региональном и линейном уровнях в хозяйстве пути / О. И. Веревкина // Надежность и качество сложных систем. – 2019. – № 1 (25). – С. 106–117. – DOI 10.21685/2307-4205-2019-1-12.