

СОДЕРЖАНИЕ

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ
НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА**

Иванов А. И., Безяев А. В., Малыгин А. Ю., Куприянов Е. Н.
МУЛЬТИПЛИКАТИВНОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ ПОЛИНОМОВ ЛЕЖАНДРА
С КЛАССИЧЕСКИМ СТАТИСТИЧЕСКИМ КРИТЕРИЕМ ВАСИЧЕКА
ДЛЯ ПРОВЕРКИ ГИПОТЕЗ РАВНОМЕРНОСТИ ЛИБО НОРМАЛЬНОСТИ
РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ДАННЫХ МАЛЫХ ВЫБОРОК..... 5

Фролов С. И., Данилова Е. А., Таньков Г. В., Кочегаров И. И., Лысенко А. В.
РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЕЗРЕЗОНАНСНЫХ
ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ
БОРТОВЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ..... 14

Grishko A. K.
ANISOTROPIC MODEL OF THE SYSTEM FOR MONITORING
AND CONTROLLING THE THERMAL PARAMETERS OF BOARD RADIO MODULES..... 25

**ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ**

**Иванов А. П., Иванов А. И., Безяев А. В., Куприянов Е. Н., Банных А. Г., Перфилов К. А.,
Лукин В. С., Савинов К. Н., Полковникова С. А., Серикова Ю. И., Малыгин А. Ю.**
ОБЗОР НОВЫХ СТАТИСТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ПРОВЕРКИ
ГИПОТЕЗЫ НОРМАЛЬНОСТИ И РАВНОМЕРНОСТИ
РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДАННЫХ МАЛЫХ ВЫБОРОК 33

Клячкин В. Н., Карпунина И. Н.
ОСОБЕННОСТИ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МУЛЬТИКЛАССОВОЙ КЛАССИФИКАЦИИ 45

Доросинский А. Ю., Прокофьев О. В., Линкова М. А., Семочкина И. Ю.
ДЕРЕВЬЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕМРИСТОРОВ 53

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ
В ПРИБОРОСТРОЕНИИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ**

Селиванова З. М., Скоморохов К. В.
ИНФОРМАЦИОННАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
НАДЕЖНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ
СИСТЕМЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ..... 61

Перевертов В. П., Кузин Н. А., Юрков Н. К.
КЛАССИФИКАЦИИ НАНОМАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТРАДИЦИОННЫХ
И АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМЕ
ТРАНСПОРТНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ..... 70

Ильин А. С., Карчев И. А., Воронов А. П. ДЕЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ДНВ-20И ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ	78
Кошелев Н. Д., Алхатем А., Новиков К. С., Цуприк А. Д., Юрков Н. К. УПРАВЛЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ РАСПОЗНАВАНИЯ РАСКАДРОВКИ ОБРАЗОВ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ.....	85

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

Коршунов Г. И., Сольнищев Р. И., Фролова Е. А. ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА И СОЗДАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ КОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ	92
--	----

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Masloboev A.V. AN OVERVIEW OF THE REGIONAL SECURITY THEORY AND METHODOLOGICAL FOUNDATIONS	102
--	-----

CONTENT

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

- Ivanov A.I., Bezyaev A.V., Malygin A.Yu., Kupriyanov E.N.**
MULTIPLICATIVE UNION OF LEGENDRE POLYNOMIALS WITH THE CLASSICAL
VASICEK STATISTICAL TEST FOR TESTING HYPOTHESES OF UNIFORMITY
OR NORMALITY OF SMALL SAMPLE DATA DISTRIBUTIONS 5
- Frolov S.I., Danilova E.A., Tan'kov G.V., Kochegarov I.I., Lysenko A.V.**
DEVELOPMENT OF DESIGN METHODS FOR RESONANT THIN-WALLED
CYLINDRICAL STRUCTURES OF ON-BOARD ELECTRONIC SYSTEMS 14
- Grishko A.K.**
ANISOTROPIC MODEL OF THE SYSTEM FOR MONITORING AND CONTROLLING
THE THERMAL PARAMETERS OF BOARD RADIO MODULES 25

**DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING
RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS**

- Ivanov A.P., Ivanov A.I., Bezyaev A.V., Kupriyanov E.N., Bannykh A.G., Perfilov K.A.,
Lukin V.S., Savinov K.N., Polkovnikova S.A., Serikova Yu.I., Malygin A.Yu.**
REVIEW OF NEW STATISTICAL CRITERIA FOR VERIFICATION OF THE HYPOTHESIS
OF NORMALITY AND UNIFORMITY OF DISTRIBUTION OF DATA IN SMALL SAMPLES 33
- Klyachkin V.N., Karpunina I.N.**
FEATURES OF DIAGNOSTICS OF TECHNICAL SYSTEMS
USING MULTICLASS CLASSIFICATION 45
- Dorosinskiy A.Yu., Prokofev O.V., Linkova M.A., Semochkina I.Yu.**
DECISION TREES BASED ON MEMRISTOR TECHNOLOGY 53

**DESIGN AND TECHNOLOGY IN INSTRUMENTATION
AND RADIO ELECTRONICS**

- Selivanova Z.M., Skomorokhov K.V.**
INFORMATION AND MATHEMATICAL MODELS FOR RELIABILITY
PREDICTION OF INTELLIGENT INFORMATION-MEASURING
SYSTEM OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF MATERIALS 61
- Perevertov V.P., Kuzin N.A., Yurkov N.K.**
CLASSIFICATIONS OF NANOMATERIALS FOR TRADITIONAL
AND ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE SYSTEM OF TRANSPORT ENGINEERING 70
- Ilin A.S., Karchev I.A., Voronov A.P.**
HIGH VOLTAGE DIVIDER DNV-20I FOR BROADBAND
INFORMATION-MEASURING SYSTEMS 78

Koshelev N.D., Alhatem A., Novikov K.S., Tsuprik A.D., Yurkov N.K.
MANAGEMENT OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS
FOR RECOGNITION MAPPING OF HIGH-DEFINITION IMAGES..... 85

**TECHNOLOGICAL BASIS FOR IMPROVING
RELIABILITY AND PRODUCT QUALITY**

Korshunov G.I., Sol' nitsev R.I., Frolova E.A.
QUALITY ASSURANCE AND CREATION OF INTELLIGENT CORROSION PROTECTION
SYSTEMS FOR PIPELINE TRANSPORTATION OF ENERGY CARRIERS..... 92

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

Masloboev A.V.
AN OVERVIEW OF THE REGIONAL SECURITY THEORY
AND METHODOLOGICAL FOUNDATIONS 102

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 519.24; 53; 57.017
doi:10.21685/2307-4205-2022-2-1

МУЛЬТИПЛИКАТИВНОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ ПОЛИНОМОВ ЛЕЖАНДРА С КЛАССИЧЕСКИМ СТАТИСТИЧЕСКИМ КРИТЕРИЕМ ВАСИЧЕКА ДЛЯ ПРОВЕРКИ ГИПОТЕЗ РАВНОМЕРНОСТИ ЛИБО НОРМАЛЬНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ДАННЫХ МАЛЫХ ВЫБОРОК

А. И. Иванов¹, А. В. Безяев², А. Ю. Малыгин³, Е. Н. Куприянов⁴

¹ Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт, Пенза, Россия
^{2, 3, 4} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹ ivan@pniei.penza.ru, ^{2, 4} tsib@pnzgu.ru, ³ mal890@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В прошлом веке создано порядка 20 статистических критериев проверки гипотезы нормального распределения данных и порядка 20 статистических критериев проверки гипотезы равномерности распределения данных. Рассматривается способ синтеза новых статистических критериев путем перемножения или деления их выходных состояний. *Материалы и методы.* Предложено выполнять перемножение (деление) отклика классического почти ортогонального полинома Лежандра на отклик классического статистического критерия Васичека. *Результаты и выводы.* Показано, что предложенные процедуры позволяют два новых сильных статистических критерия объединять с критерием Васичека. В итоге получается бинарный выходной код с трехкратной избыточностью. Свертывание избыточности кода позволяет снизить вероятности появления ошибок первого и второго рода в 5 раз.

Ключевые слова: статистический критерий Васичека, почти ортогональный полином Лежандра второго порядка, эквивалентные статистическим критериям искусственные нейроны, синтез новых статистических критериев перемножением выходных состояний известных критериев

Для цитирования: Иванов А. И., Безяев А. В., Малыгин А. Ю., Куприянов Е. Н. Мультипликативное объединение полиномов Лежандра с классическим статистическим критерием Васичека для проверки гипотез равномерности либо нормальности распределений данных малых выборок // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 5–13. doi:10.21685/2307-4205-2022-2-1

MULTIPLICATIVE UNION OF LEGENDRE POLYNOMIALS WITH THE CLASSICAL VASICEK STATISTICAL TEST FOR TESTING HYPOTHESES OF UNIFORMITY OR NORMALITY OF SMALL SAMPLE DATA DISTRIBUTIONS

A.I. Ivanov¹, A.V. Bezyaev², A.Yu. Malygin³, E.N. Kupriyanov⁴

¹ Penza Research Institute of Electrical Engineering, Penza, Russia
^{2, 3, 4} Penza State University, Penza, Russia
¹ ivan@pniei.penza.ru, ^{2, 4} tsib@pnzgu.ru, ³ mal890@yandex.ru

Abstract. Background. In the last century, about 20 statistical criteria for testing the hypothesis of normal distribution of data and about 20 statistical criteria for testing the hypothesis of uniform distribution of data were created. The article considers a method for synthesizing new statistical criteria by multiplying or dividing their output states. **Materials and methods.** It is proposed to multiply (divide) the response of the classical almost orthogonal Legendre polynomial to the response of the classical Vasicek statistical test. **Results and conclusions.** It is shown that the proposed procedures allow two new strong statistical tests to be combined with the Vasicek test. The result is a binary output code with threefold redundancy. Code redundancy folding reduces the probability of occurrence of errors of the first and second kind by 5 times.

Keywords: Vasicek's statistical test, almost orthogonal Legendre polynomial of the second order, artificial neurons equivalent to statistical criteria, synthesis of new statistical tests by multiplying output states of known criteria

For citation: Ivanov A.I., Bezyaev A.V., Malygin A.Yu., Kupriyanov E.N. Multiplicative union of Legendre polynomials with the classical Vasicek statistical test for testing hypotheses of uniformity or normality of small sample data distributions. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(2):5–13. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-2-1

Введение

Прошлый век начался со значимого для математической статистики события. В 1900 г. Пирсоном был создан хи-квадрат критерий. Сегодня хи-квадрат критерий Пирсона является стандартным¹, на ряду с другими классическими статистическими критериями². В целом математической общественностью в XX в. было разработано более 21 критерия для проверки гипотезы нормального распределения данных и порядка 24 статистических критериев для проверки гипотезы равномерного распределения данных [1]. К сожалению, большинство ранее разработанных статистических критериев были ориентированы на обработку больших выборок в 200 и более примеров. Это существенно ограничивает область применения математической статистики. Так, в биометрии, медицине, экономике часто приходится иметь дело с малым числом примеров, доступных реальным практикам. Ждать накопления больших (представительных) статистических выборок нежелательно. Целесообразно работать с теми объемами статистики, которые легко доступны.

Еще одним важным аспектом является то, что уже сегодня разрабатываются перспективные алгоритмы быстрого и устойчивого обучения сетей искусственных нейронов, использующие подбор биометрических параметров с тем или иным законом распределения значений. Поясним эту перспективную технологию на примере анализа динамики рукописного почерка в среде моделирования «БиоНейроАвтограф» [2]. На рис. 1 приведено реальное распределение математических ожиданий 416 биометрических параметров, извлекаемых из динамики рукописного слова «Пенза» двухмерным преобразованием Фурье.

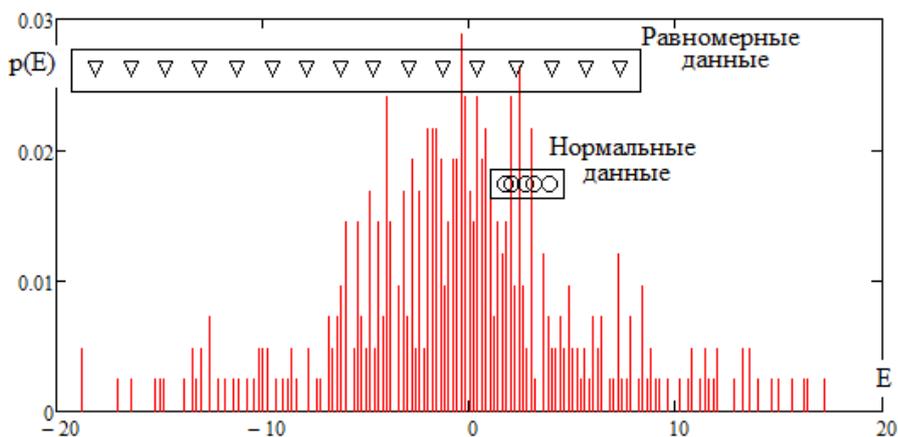


Рис. 1. Пример распределения значений математических ожиданий 416 биометрических параметров рукописного слова «Пенза»

Обучение нейронов ведется следующим образом. Если требуется отклик искусственного нейрона «0», то на 16 его входов подаются биометрические параметры с близкими математическими

¹ Р 50.1.037-2002. Рекомендации по стандартизации. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть I. Критерии типа χ^2 .

² Р 50.1.037-2002. Прикладная статистика. Правила проверки согласия опытного распределения с теоретическим. Часть II. Непараметрические критерии.

ожиданиями. Если требуется состояние «1», то на входы нейрона подаются биометрические параметры с достаточно большим расстоянием между их математическими ожиданиями. Биопараметры с близкими математическими ожиданиями всегда дают нормальное распределение входных данных нейрона, так как каждый из биопараметров имеет нормальное распределение. Биопараметры с разнесенными математическими ожиданиями всегда дают распределение близкое к равномерному. При этом один нейрон или группа нейронов должны уметь с высокой достоверностью различать между собой данные с нормальным и равномерным распределением.

Нейросетевое объединение нескольких статистических критериев для проверки гипотезы нормального или равномерного распределения данных

В XXI в. активно развиваются нейросетевые технологии, более того, пришло понимание, что любой из известных статистических критериев может быть представлен как некоторый эквивалентный ему искусственный нейрон. На сегодняшний день мы имеем коллекцию из порядка 30 статистических критериев, для которых уже построены эквивалентные им искусственные нейроны [3–5]. На данный момент для всех исследованных на сегодня статистических критериев удалось построить эквивалентные им искусственные нейроны.

Более того, формально искусственных нейронов может быть как угодно много. В литературе наиболее часто используются нейроны с накоплением данных в линейном пространстве суммированием. Так же хорошо изучены квадратичные нейроны с накоплением данных суммированием с предварительным квадратичным деформированием входного пространства. Любое иное искажение пространства входных данных перед суммированием будет давать некоторый искусственный нейрон, свойства которого слабо изучены. В этом отношении статистические критерии и эквивалентные им нейроны занимают промежуточное положение. Их статистические функционалы достаточно хорошо исследованы на больших выборках (при большом числе входов у эквивалентных им нейронов). Новизна материала данной статьи состоит в рассмотрении снижения числа входов у эквивалентных искусственных нейронов до 16 под малые выборки в 16 опытов.

При переходе к искусственным нейронам удается естественным образом объединять или совместно использовать несколько статистических критериев. Достаточно сформировать однослойную сеть из эквивалентных статистическим критериям нескольких искусственных нейронов. Структура такой однослойной сети параллельно работающих искусственных нейронов отображена на рис. 2.

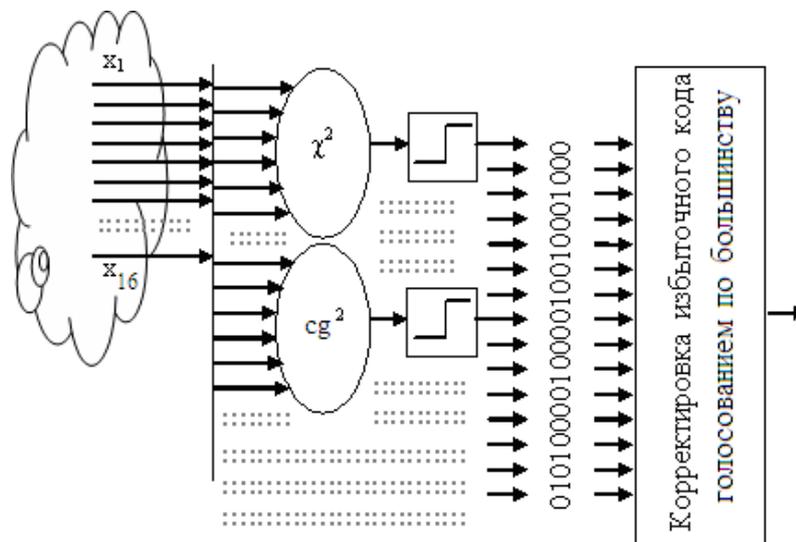


Рис. 2. Параллельная обработка малой выборки в 16 опытов несколькими искусственными нейронами эквивалентными хи-квадрат критерию и иным известным статистическим критериям проверки той или иной гипотезы

Каждый из созданных в XX в. статистических критериев плохо работает на малых выборках. Например, на выборке в 16 опытов хи-квадрат критерий Пирсона дает значение появления вероятности ошибок первого и второго рода на уровне $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,33$, что примерно в 10 раз хуже, чем требует практика. Очевидно, что, объединив в одну нейросеть 20 эквивалентных статистическим критериям нейронов, на выходе такой нейросети мы будем получать выходной код с 20-кратной из-

быточностью, т.е. мы всегда можем свернуть избыточный код, скорректировав в его разрядах ошибки [6, 7]. В простейшем случае может быть использован самокорректирующийся код, построенный на равноправном голосовании большинства состояний его разрядов.

Статистический критерий Васичека как один из самых эффективных классических критериев проверки гипотезы нормального распределения малых выборок

Существующие статистические критерии ведут себя по-разному в разных условиях. Для того, чтобы их сравнивать между собой, необходимо приводить их к одинаковым условиям. Очевидно, что при сравнении должны использоваться выборки одинакового размера. Кроме того, желательно выполнить симметризацию задачи по выбору порога принятия решения через выравнивание вероятностей появления ошибок первого и второго рода. Будем рассматривать задачу анализа малых выборок в 16 опытов для одного из самых мощных классического статистического критерия Васичека [1]. Будем рассматривать процесс принятия искусственным нейроном Васичека решения о различении малых выборок с альтернативой нормального и равномерного распределения входных данных. Статистики выходных состояний искусственного нейрона отражены на рис. 3.

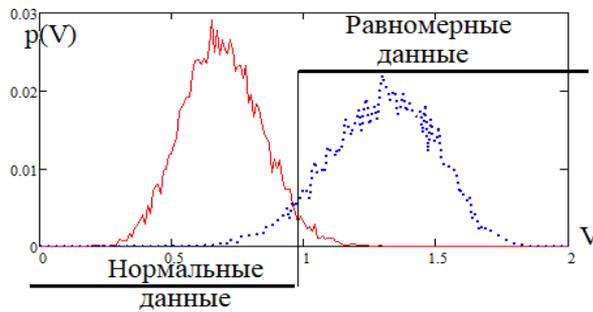


Рис. 3. Распределение выходных состояний критерия Васичека и эквивалентного ему искусственного нейрона для малой выборки в 16 опытов

Из рис. 3 видно, что при значении порога принятия решений нейроном $V = 0,94$ вероятности ошибок первого и второго рода оказываются близки и составляют $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,055$, т.е. критерий Васичека является одним из самых мощных классических критериев, созданных в прошлом веке для проверки гипотезы нормального распределения данных малых выборок в 16 опытов. Мощность критерия Васичека оказывается выше хи-квадрат критерия Пирсона в $0,33/0,055 = 6$ раз. Программное обеспечение на языке MathCAD для реализации численного эксперимента моделирования критерия Васичека приведено на рис. 4.

```

sx(rr) :=
x ← sort(morm(16,0,1 + rr))
x ← x - x0
V4 ←  $\left[ \prod_{i=0}^{10} (x_{i+4} - x_i) \right]^{\frac{1}{11}}$ 
x ←  $\frac{x}{x_{15}}$ 
x ← 2x - 1
Le ←  $\sum_{i=0}^{15} \left[ \left[ 3.0 \cdot (x_i)^2 - 0.2 \right]^2 \cdot \frac{1}{16} \right]$ 
 $\left( \text{Le} \quad \frac{\text{Le}}{V4} \quad V4 \cdot \text{Le} \quad V4 \right)$ 

sxr(rr) :=
x ← sort(runif(16, -3 - rr, 3 + rr))
x ← x - x0
V4 ←  $\left[ \prod_{i=0}^{10} (x_{i+4} - x_i) \right]^{\frac{1}{11}}$ 
x ←  $\frac{x}{x_{15}}$ 
x ← 2x - 1
Le ←  $\sum_{i=0}^{15} \left[ \left[ 3.0 \cdot (x_i)^2 - 0.2 \right]^2 \cdot \frac{1}{16} \right]$ 
 $\left( \text{Le} \quad \frac{\text{Le}}{V4} \quad V4 \cdot \text{Le} \quad V4 \right)$ 

sx(0.01) = (1.651 2.777 0.981 0.594)
sxr(0.01) = (1.907 1.686 2.158 1.131)
    
```

Рис. 4. Фрагмент программы, воспроизводящей на языке MathCAD отклики нейрона Васичека и оптимизированного полиномиального нейрона Лежандра

Моделирование ортогональных и почти ортогональных полиномов Лежандра второго порядка

Следует отметить, что рассмотренная выше ситуация синтеза искусственных нейронов ориентирована на разделение двух типов данных с нормальным и равномерным распределением. Перспективные быстрые алгоритмы обучения больших сетей искусственных нейронов биометрической аутентификации сегодня строятся подключением входов их нейронов к нормально распределенным данным или к равномерно распределенным биометрическим данным. При этом сколько искусственных нейронов будет работать параллельно (см. рис. 1), не имеет значения. Главное, чтобы их общее решение после свертки избыточности имело заранее заданный уровень достоверности. Технически оказалось выгодно увеличивать число параллельно работающих нейронов или эквивалентных им статистических критериев.

В связи с этим нам желательно иметь математические конструкции, изначально оптимизированные под обработку нормальных и равномерных данных. Кроме того, из теории нелинейных динамических объектов [8–11] нам известно о возможности ортогонализации вычислительных процедур. В связи с этим имеет смысл попытаться использовать полиномы Лежандра [11], так как они ортогональны для случайных данных с равномерным распределением в интервале от -1 до $+1$. Ранее проведенные исследования показали, что снижение размеров выборки биометрических данных размывает эффект ортогонализации полиномов. В связи с этим в работе [12] выполнена оптимизация полинома Лежандра второго порядка, выполненная заменой единичной составляющей полинома на значение $0,2$ (см. рис. 3). Такая оптимизация позволяет снизить вероятности появления ошибок первого и второго рода на 41% до значений $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,262$. На рис. 5 приведены распределения выходных состояний почти ортогонального полиномиального нейрона Лежандра второго порядка для малых выборок в 16 опытов.

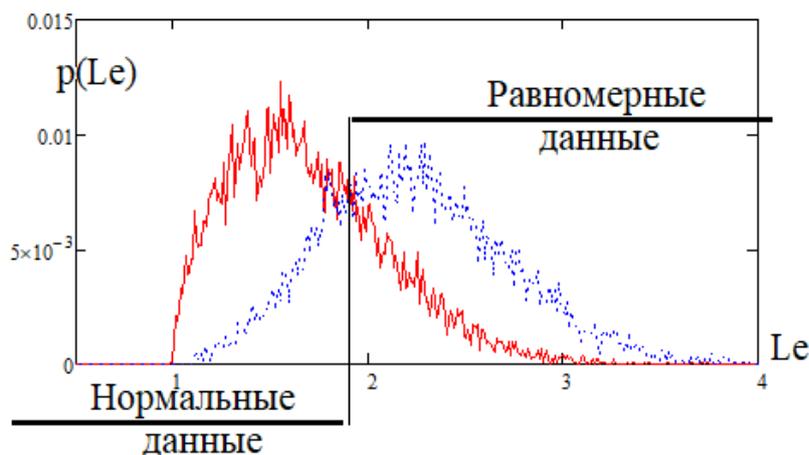


Рис. 5. Выходные состояния искусственного оптимизированного полиномиального нейрона Лежандра на малой выборке в 16 опытов

Новый статистический критерий почти ортогонального полинома Лежандра второго порядка имеет мощность в $0,33/0,264 = 1,26$ выше по сравнению с хи-квадрат критерием Пирсона. Тем не менее его прямое использование в нейросетевых корректорах ошибок принятия решений на данный момент не целесообразно.

Мультипликативный синтез новых более мощных статистических критериев умножением и делением выходных состояний классического критерия Васичека и полиномиального критерия Лежандра

Одним из вариантов синтеза нового комбинированного критерия является перемножение выходных состояний критерия Лежандра и критерия Васичека. Статистики выходных состояний нового искусственного нейрона отображены на рис. 3, программное обеспечение численного эксперимента для исследования нового критерия отображено на рис. 4. При пороге квантования $LeV = 1,77$ близкие вероятности ошибок первого и второго рода составляют $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,092$.

Вторым вариантом синтеза нового статистического критерия является деление отклика критерия Лежандра на отклик критерия Васичека. Выходные состояния нового искусственного нейрона отображены на рис. 6. При пороге квантования $Le/V = 2,05$ близкие вероятности ошибок первого и второго рода составляют $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,262$.

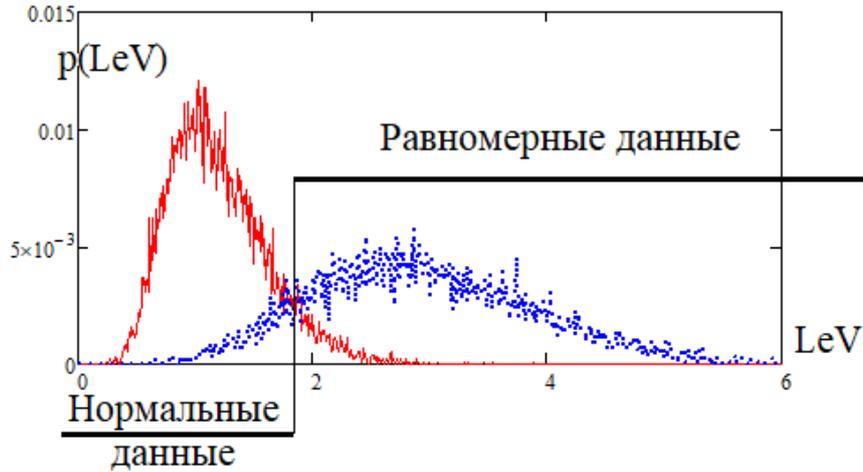


Рис. 6. Выходные состояния искусственного нейрона, синтезированного умножением полинома Лежандра на отклик критерия Васичека на выборке в 16 опытов

Таким образом, в дополнение к достаточно мощному критерию Васичека, мы получили два новых дополнительных статистических критериев с мощностью выше, чем у входящего в них исходного критерия Лежандра (рис. 7).

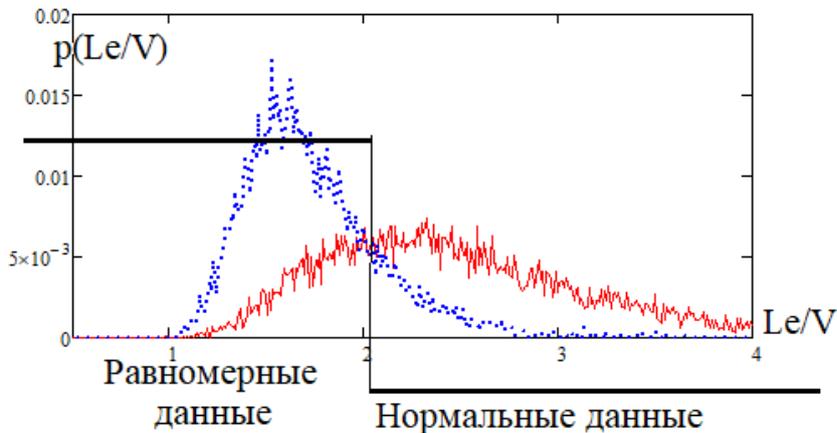


Рис. 7. Выходные состояния искусственного нейрона, синтезированного делением полинома Лежандра на отклик критерия Васичека на малой выборке в 16 опытов

Синтез нейросетевого корректора ошибок с тройной кодовой избыточностью для разделения данных малых выборок с нормальным и равномерным распределениями

Очевидным является то, что простейшие конструкции свертывания кодовой избыточности голосованием разрядов (см. рис. 1) малоэффективны по сравнению с более сложными кодовыми конструкциями [12]. Вопрос состоит только в том, как научиться создавать более сложные кодовые конструкции для нейронных сетей, обобщающих группы статистических критериев? При этом выигрыш от перехода к более сложным кодовым конструкциям всегда будет расти с ростом кодовой избыточности.

В рассматриваемом нами случае объединяются всего два критерия: статистический критерий Васичека и статистический критерий Лежандра. Построить на двух критериях простейший корректор нельзя. Однако если мы из двух критериев создадим четыре критерия, то можем взять три самых

мощных критерия и построить на них простейший сверточный самокорректирующийся код, устраняющий трехкратную избыточность. Структура организации этого кода отображена на рис. 8.

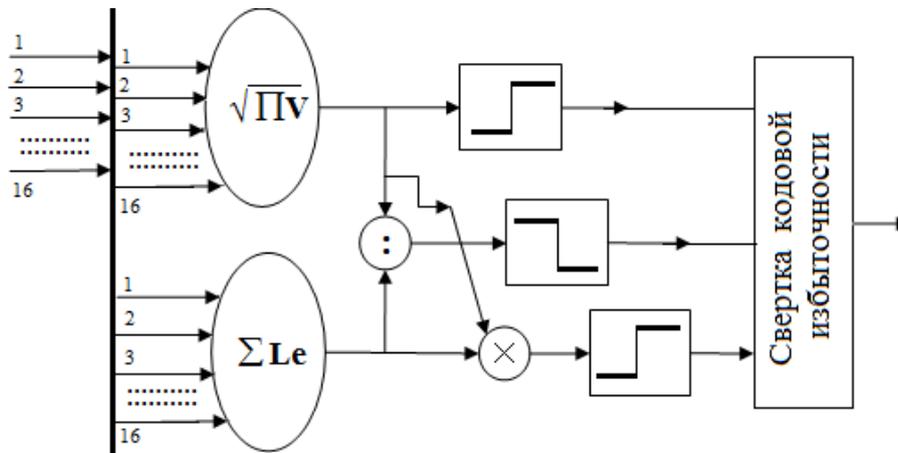


Рис. 8. Параллельная обработка данных тремя статистическими критериями с синтезом обнаружителя и корректора ошибок с тройной кодовой избыточностью

Заключение

Таким образом, мы получаем возможность за счет нелинейных операций перемножения и деления выходных состояний двух статистических критериев создавать достаточно сложную конструкцию, способную эффективно обнаруживать и исправлять ошибочные кодовые состояния. Это позволяет снизить вероятность ошибок по сравнению с лучшим одиночным критерием Васичека $P_{EE} \approx 0,055$ до итоговой вероятности $P_{EE} \approx 0,011$. Эффект достигается объединением трех статистических критериев. Для рассмотренной самокорректирующейся кодовой конструкции с трехкратной избыточностью удастся достичь пятикратного снижения вероятности появления ошибок. Последнее является подтверждением высокой эффективности рассмотренного в статье направления по мультипликативному объединению уже известных и новых статистических критериев.

Список литературы

1. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М. : Физматлит, 2006. 816 с.
2. Иванов А. И., Захаров О. С. Среда моделирования «БиоНейроАвтограф». Программный продукт для проведения лабораторных работ студентами, размещен с 2009 г. на сайте АО «ПНИЭИ». URL: <http://пниэи.рф/activity/science/noc/bioneuroautograph.zip>
3. Иванов А. И., Банных А. Г., Безяев А. В. Искусственные молекулы, собранные из искусственных нейронов, воспроизводящих работу классических статистических критериев // Вестник Пермского университета. Сер.: Математика. Механика. Информатика. 2020. № 1. С. 26–32.
4. Иванов А. И. Искусственные математические молекулы: повышение точности статистических оценок на малых выборках (программы на языке MathCAD) : препринт. Пенза : Из-во ПГУ, 2020. 36 с.
5. Иванов А. И., Банных А. Г., Куприянов Е. Н. [и др.]. Коллекция искусственных нейронов эквивалентных статистическим критериям для их совместного применения при проверке гипотезы нормальности малых выборок биометрических данных // Безопасность информационных технологий : сб. науч. ст. по материалам I Всерос. науч.-техн. конф. Пенза, 2019. С. 156–164.
6. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования : пер. с англ. М. : Техносфера, 2007. 320 с.
7. Безяев А. В. Биометрико-нейросетевая аутентификация: обнаружение и исправление ошибок в длинных кодах без накладных расходов на избыточность : препринт. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. 40 с.
8. Иванов А. И. Одномерный аналог многомерной идентификации Ли-Щецена // Управляющие системы и машины. 1999. № 2. С. 16–21.
9. Иванов А. И. Быстрый синтез моделей нелинейных динамических систем с заданной погрешностью // Измерительная техника. 1995. № 10. С. 13–15.
10. Ivanov A. I. Two Methods of Hammersteine Orthogonal Model Identification with the Possibility of Convergence Defect Estimation // Engineering Simulation. 1999. Vol. 16. P. 553–560.
11. Иванов А. И. Нейросетевые технологии биометрической аутентификации пользователей открытых систем : автореф. ... дис. д-ра техн. наук. Пенза, 2002. 34 с.

12. Куприянов Е. Н. Оптимизация параметров полиномиального критерия Лежандра, ориентированного на проверку гипотезы равномерного распределения данных малых выборок // Безопасность информационных технологий : сб. науч. ст. по материалам IV Всерос. науч.-техн. конф. Пенза, 2022. С. 56–60.

References

1. Kobzar' A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov = Applied mathematical statistics. For engineers and researchers.* Moscow: Fizmatlit, 2006:816. (In Russ.)
2. Ivanov A.I., Zakharov O.S. *Sreda modelirovaniya «BioNeyroAvtograf». Programmnyy produkt dlya provedeniya laboratornykh rabot studentami, razmeshchen s 2009 g. na sayte AO «PNIEI» = Modeling environment "Bioneuroautograph". A software product for conducting laboratory work by students, posted since 2009 on the website of JSC PNIEI.* (In Russ.). Available at: <http://pniei.rf/activity/science/noc/bioneuroautograph.zip>
3. Ivanov A.I., Bannykh A.G., Bezyaev A.V. Artificial molecules assembled from artificial neurons reproducing the work of classical statistical criteria. *Vestnik Permskogo universiteta. Ser.: Matematika. Mekhanika. Informatika = Bulletin of the Perm University. Ser.: Matematika. Mechanics. Computer science.* 2020;(1):26–32. (In Russ.)
4. Ivanov A.I. *Iskusstvennye matematicheskie molekuly: povyshenie tochnosti statisticheskikh otsenok na malykh vyborkakh (programmy na yazyke MathCAD): preprint = Artificial mathematical molecules: improving the accuracy of statistical estimates on small samples (programs in MathCAD) : preprint.* Penza: Iz-vo PGU, 2020:36. (In Russ.)
5. Ivanov A.I., Bannykh A.G., Kupriyanov E.N. [et al.]. Collection of artificial neurons equivalent to statistical criteria for their joint application when testing the hypothesis of normality of small samples of biometric data. *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy: sb. nauch. st. po materialam I Vseros. nauch.-tekhn. konf. = Information technology security : collection of scientific articles based on the materials of I All-Russian Scientific-technical. conf.* Penza, 2019:156–164. (In Russ.)
6. Morelos-Saragosa R. *Iskusstvo pomekhoustoychivogo kodirovaniya: per. s angl. = The art of noise-resistant coding : trans. from English.* Moscow: Tekhnosfera, 2007:320. (In Russ.)
7. Bezyaev A.V. *Biometriko-neyrosetevaya autentifikatsiya: obnaruzhenie i ispravlenie oshibok v dlinnykh kodakh bez nakladnykh raskhodov na izbytochnost': preprint = Biometric-neural network authentication: detection and correction of errors in long codes without redundancy overhead : preprint.* Penza: Izd-vo PGU, 2020:40. (In Russ.)
8. Ivanov A.I. One-dimensional analogue of the multidimensional identification of Li-Shchetsin. *Upravlyayushchie sistemy i mashiny = Control systems and machines.* 1999;(2):16–21. (In Russ.)
9. Ivanov A.I. Rapid synthesis of models of nonlinear dynamic systems with a given error. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring equipment.* 1995;(10):13–15. (In Russ.)
10. Ivanov A.I. Two Methods of Hammersteine Orthogonal Model Identification with the Possibility of Convergence Defect Estimation. *Engineering Simulation.* 1999;16:553–560.
11. Ivanov A.I. Neural network technologies of biometric authentication of users of open systems. DSc abstract. Penza, 2002:34. (In Russ.)
12. Kupriyanov E.N. Optimization of parameters of the Legendre polynomial criterion aimed at testing the hypothesis of uniform distribution of small sample data. *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy: sb. nauch. st. po materialam IV Vseros. nauch.-tekhn. konf. = Security of information technologies : collection of scientific articles based on the materials of the IV All-Russian Scientific-Technical. conf.* Penza, 2022:56–60. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Иванович Иванов

доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
Пензенский научно-исследовательский
электротехнический институт
(Россия, г. Пенза, ул. Советская, 9)
E-mail: ivan@pniei.penza.ru

Aleksandr I. Ivanov

Doctor of technical sciences, associate professor,
senior researcher,
Penza Research Electrotechnical Institute
(9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

Александр Викторович Безяев

кандидат технических наук, докторант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tsib@pnzgu.ru

Aleksandr V. Bezyaev

Candidate of technical sciences,
doctor's degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Юрьевич Мальгин

доктор технических наук, профессор,
начальник межотраслевой лаборатории тестирования
биометрических устройств и технологий,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: mal890@yandex.ru

Aleksandr Yu. Malygin

Doctor of technical sciences, professor,
head of the Intersectoral testing laboratory
of biometric devices and technologies,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Евгений Николаевич Куприянов

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: evgnkupr@gmail.com

Evgeniy N. Kupriyanov

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 15.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 10.01.2022

Принята к публикации/Accepted 15.02.2022

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ БЕЗРЕЗОНАНСНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ БОРТОВЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

С. И. Фролов¹, Е. А. Данилова², Г. В. Таньков³, И. И. Кочегаров⁴, А. В. Лысенко⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹ sfrolov46@mail.ru, ² siori@list.ru, ³ g.tankov43@mail.ru, ⁴ kipra@pnzgu.ru, ⁵ lysenko_av@bk.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Основу несущих конструкций бортовых радиоэлектронных средств (БРЭС), как и многих других изделий машиностроения, составляют тонкостенные элементы – стержни, пластины, оболочки, которые должны обеспечить необходимую прочность, устойчивость и жесткость конструкции при заданных ограничениях по массе. При этом выбор конструктивных запасов всех параметров работоспособности элементов таких конструкций (коэффициентов безопасности, запасов прочности) должен обеспечить надежность равную или выше требуемой, которая может достигаться созданием безрезонансных конструкций в заданном диапазоне частот вибрации. Целью работы является разработка инженерной методики расчета необходимого запаса отстройки собственной частоты колебаний (СЧК) и ее практическое использование. *Материалы и методы.* В работе используются положения теории механических колебаний для получения аналитических выражений собственной частоты колебаний цилиндрической оболочки. Для численного решения используются методы конечных элементов и программный пакет ANSYS. *Результаты.* Предложены результаты расчетов СЧК тонкостенных конструкций БРЭС, позволяющие обоснованно выбрать размеры конструкции с точки зрения защиты от резонанса. Выполнены численные решения тестовых задач с использованием комплекса программ ANSYS, сделаны выводы и даны рекомендации по созданию безрезонансных в заданном диапазоне частот вибрации тонкостенных конструкций блоков БРЭС в форме круговых бочек. *Вывод.* Результаты работы представлены в виде рекомендаций по определению основных СЧК кожухов в виде круговых бочек и выбору на ранних стадиях проектирования конструктивных решений по созданию безрезонансных конструкций.

Ключевые слова: цилиндрическая оболочка, многогранная призма, собственная частота колебаний, математическое моделирование, вибрация, резонанс, защита от механических воздействий, тонкостенные конструкции

Для цитирования: Фролов С. И., Данилова Е. А., Таньков Г. В., Кочегаров И. И., Лысенко А. В. Разработка методов проектирования безрезонансных тонкостенных цилиндрических конструкций бортовых радиоэлектронных систем // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 14–24. doi:10.21685/2307-4205-2022-2-2

DEVELOPMENT OF DESIGN METHODS FOR RESONANT THIN-WALLED CYLINDRICAL STRUCTURES OF ON-BOARD ELECTRONIC SYSTEMS

S.I. Frolov¹, E.A. Danilova², G.V. Tan'kov³, I.I. Kochegarov⁴, A.V. Lysenko⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Penza State University, Penza, Russia
¹ sfrolov46@mail.ru, ² siori@list.ru, ³ g.tankov43@mail.ru, ⁴ kipra@pnzgu.ru, ⁵ lysenko_av@bk.ru

Abstract. *Background.* The basis of the load-bearing structures of on-board electronic systems (OES), as well as many other engineering products, are thin-walled elements – rods, plates, shells, which should provide the necessary strength, stability and rigidity of the structure under given weight restrictions. At the same time, the choice of design margins for all performance parameters of elements of such structures (safety factors, safety margins) should ensure reliability equal to or higher than the required one, which can be achieved by creating resonance-free structures in a given vibration frequency range. The aim of the work is to develop an engineering methodology for calculating the necessary margin for detuning the natural frequency of oscillations and its practical use. *Materials and methods.* The paper uses the provisions of the theory of mechanical vibrations to obtain analytical expressions for the natural vibration frequency of a cylindrical shell. For the numerical solution, finite element methods and the ANSYS software

package are used. *Results.* The results of calculations of the natural frequency of vibrations of thin-walled structures of on-board radio-electronic equipment are proposed, which make it possible to reasonably select the dimensions of the structure in terms of protection against Numerical solutions of test problems are performed using the ANSYS software package, conclusions are drawn and recommendations are given for the creation of resonance-free in a given vibration frequency range of thin-walled structures of on-board radio-electronic equipment units in the form of circular barrels. *Conclusion.* The results of the work are presented in the form of recommendations for determining the main natural vibration frequencies of casings in the form of circular barrels and choosing design solutions for creating non-resonant structures at the early stages of designing.

Keywords: cylindrical shell, polyhedral prism, natural oscillation frequency, mathematical modeling, vibration, resonance, protection against mechanical impacts, thin-walled structures

For citation: Frolov S.I., Danilova E.A., Tan'kov G.V., Kochegarov I.I., Lysenko A.V. Development of design methods for resonant thin-walled cylindrical structures of on-board electronic systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(2):14–24. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-2-2

Введение

Как известно, вибрации конструкции являются причиной 30–40 % всех отказов БРЭС главным образом из-за наличия резонансов тонкостенных элементов их конструкции и недостаточной эффективности применяемых методов снижения амплитуды вибрации с использованием амортизации и/или демпфирования, что следует отнести к конструктивным недоработкам. В то же время незаслуженно мало используется на практике метод отстройки резонансных частот конструкций за пределы частот вибрации.

Это, в частности, объясняется тем, что в качестве запаса отстройки принято использовать частотное отношение $f_0/f \geq 2$, где f_0 – основная (минимальная) собственная частота колебаний, а f – частота возбуждения колебаний [1]. Обеспечение такого большого запаса отстройки делает конструирование безрезонансных тонкостенных конструкций крайне сложным. В частности, это относится к таким объемным конструкциям, как тонкостенные кожухи блоков БРЭС различной формы.

В данной статье приведены результаты исследований СЧК тонкостенных конструкций БРЭС в виде цилиндрических оболочек и рассмотрена возможность обеспечения необходимого запаса отстройки СЧК с использованием формы блока в виде круговой бочки (образующая – дуга окружности) [2]. Тестовые задачи с применением пакета программ ANSYS дают возможность предоставить рекомендации по конструированию безрезонансных кожухов БРЭС на ранних стадиях проектирования.

Основная часть

Кожухи блоков БРЭС ограничивают их внутренний объем, защищая от воздействия факторов окружающей среды, и по технологическим соображениям обычно выполняются в виде прямоугольных параллелепипедов или других форм из плоских тонких пластин. Такие кожухи имеют резонансы в широком диапазоне частот, что во многих случаях отрицательно сказывается на надежности аппаратуры. Отстроить СЧК такого кожуха на практике оказывается трудной задачей, решение которой, как правило, достигается увеличением массы кожуха, например, увеличением толщины стенок кожуха или добавлением перемычек, как это показано на рис. 1 [3].

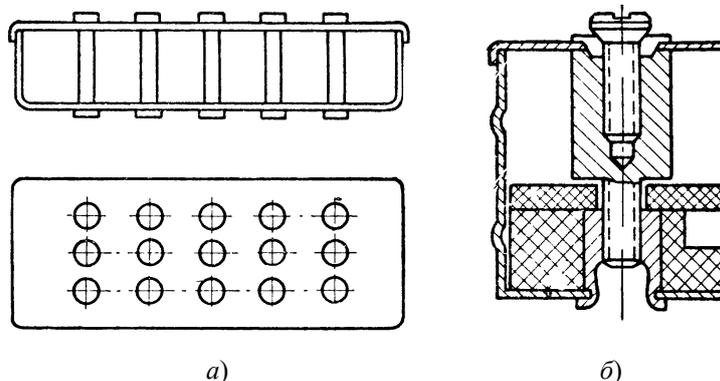


Рис. 1. Коробчатая конструкция кожуха блока с жесткими перемычками между стенками (а), конструкция перемычки (б)

В обоснованных случаях кожухи могут иметь формы отличные от параллелепипеда, в том числе с использованием оболочек различной кривизны. Например, это часто бывает в случае приборных отсеков авиационных ракет малой и средней дальности, где цилиндрический защитный кожух одновременно является обшивкой приборного отсека (рис. 2).



Рис. 2. Цилиндрическая форма блока БРЭС

Здесь важно отметить, что с точки зрения отстройки резонансных частот, цилиндрическая форма блока в сравнении с коробчатой формой и плоскими гранями, при сопоставимых по величине объемах и массе, обладает большей жесткостью, что позволяет создать безрезонансную конструкцию с меньшим весом и габаритами.

Действительно, в этом легко убедиться, выполнив расчеты СЧК кожухов с заземленными торцами в виде тонкостенного правильного параллелепипеда и тонкостенного цилиндра, имеющих одинаковую площадь поверхности (одинаковую массу при одинаковом материале одной толщины).

Задача нахождения СЧК правильного параллелепипеда сводится к определению СЧК прямоугольной пластины толщиной h со сторонами l и a ($l \geq a$), аналитическое решение которой известно [4]:

$$f = \frac{\alpha_i h}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\mu^2)}}, \quad (1)$$

где E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона; ρ – плотность материала; l , a – длина и ширина боковой грани параллелепипеда.

Частотный коэффициент α_i основного обертона такой прямоугольной пластины определяется по формуле

$$\alpha_1 = 22,37 \sqrt{1 + 0,48l^2/a^2 + 0,19l^4/a^4}. \quad (2)$$

Для определения СЧК замкнутых круговых цилиндрических оболочек используется формула [4]

$$f_{и} = \frac{K_{mn}}{2\pi R} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}, \quad (3)$$

где R – радиус цилиндра; E – модуль Юнга; μ – коэффициент Пуассона; ρ – плотность материала цилиндра.

Частотный коэффициент K_{mn} при $\mu = 0,3$ определяется по формуле

$$K_{mn} = 2,33 \cdot \left(\frac{l}{R}\right)^{-0,935} \cdot \left(\frac{R}{h}\right)^{-0,45},$$

где l – длина цилиндра; h – толщина стенок цилиндра.

Для всех расчетов принимаем: периметр 600 мм; длина $l = 240$ мм; толщина стенки $h = 1$ мм; механические характеристики материала:

$$E = 1,96 \cdot 10^{11} \text{ Па}, \mu = 0,3, \rho = 7700 \text{ кг/м}^3.$$

Результаты расчетов основных СЧК и соответствующих собственных форм колебаний, найденных методом конечных элементов (МКЭ) программного комплекса *ANSYS*, приведены ниже (рис. 3).

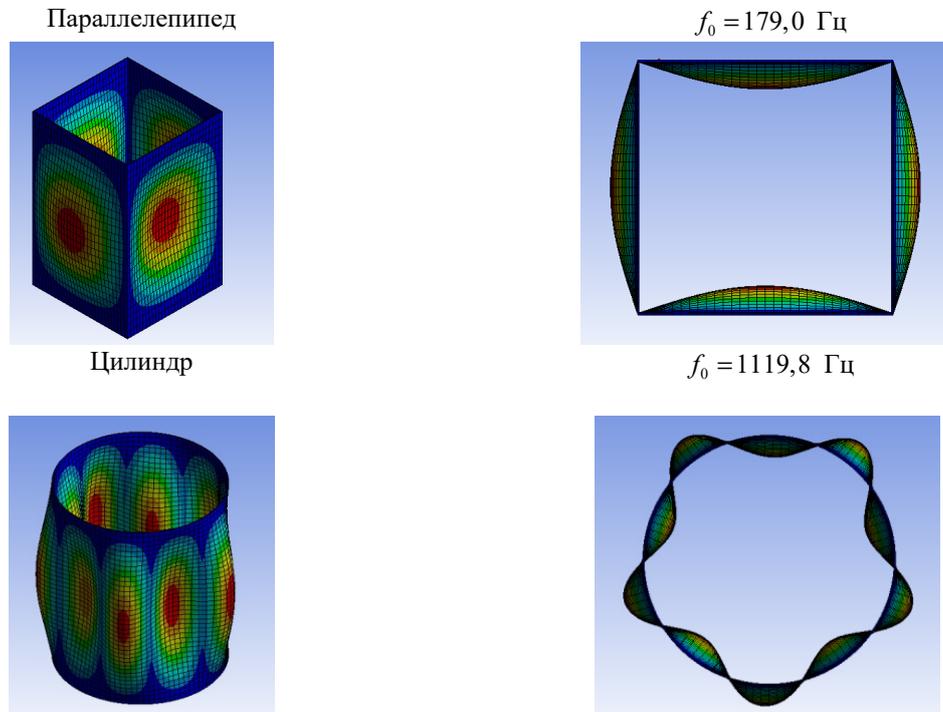


Рис. 3. СЧК и соответствующие им формы собственных колебаний

Найденные значения СЧК сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов СЧК

Параметры параллелепипеда			f , гц		
К-во граней	Сторона, мм	Угол, °	Формула	Ансис	%
4	150	90	175,9	179,0	1,71
Цилиндр			1114,7	1119,8	0,46

Как следует из результатов расчетов, основные СЧК тонкостенных конструкций в виде цилиндра примерно в 6 раз больше, чем СЧК в виде параллелепипеда той же массы, что надо учитывать при проектировании объемных безрезонансных конструкций.

Однако из-за требуемого запаса отстройки и жестких ограничений по массе использование цилиндрической формы кожуха блоков при конструировании БРЭС не всегда обеспечивает создание безрезонансной конструкции, что делает актуальным поиск способов дальнейшего повышения жесткости кожуха путем подбора ему более жесткой формы с минимальным увеличением массы.

Здесь уместно обратиться к результатам эволюционного решения этой задачи в природе. Множество даже самых современных технических достижений человечества тем или иным образом берут свое начало из того, что встречается в природе. Как говорится: «Что бы вы не делали, природа это уже сделала, причем лучше». Эволюция – это крайне длительный и сложный процесс, и адаптационные изменения, приобретенные в ходе эволюции, всегда оправданы и имеют вполне практическое применение. В нашем случае наиболее подходящий пример – жуки и форма их тела.

Необычайная приспособляемость жуков к самым различным условиям жизни во многом объясняется строением их тела.

На рис. 4 приведены примеры типичного строения тела жуков, особенностью которого является форма защитного покрова (кожуха), обеспечивающая необходимую его жесткость при минимальной массе. Эта подсказка природы приводит нас к мысли об актуальности исследований основных СЧК кожухов БРЭС в форме круговой бочки как наиболее близкого аналога формы строения тела жуков с учетом требований технологичности изготовления на производстве.



Рис. 4. Типичное строение тела жуков

Из известных авторам работ похожие исследования приведены в работе [5], где определялись основные СЧК круговых цилиндрических оболочек с начальными искривлениями продольных образующих в виде параболы (рис. 5). Исходя из условия, что амплитуда отклонения от формы цилиндра $a \ll r_1$, и используя уравнения колебаний цилиндрических оболочек, получены результаты, на основе которых сделан вывод, что для выпуклых оболочек с увеличением амплитуды отклонения их минимальная СЧК растет.

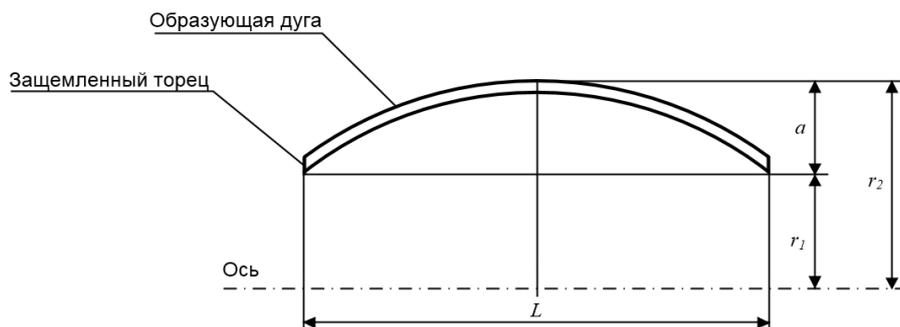


Рис. 5. Цилиндрические оболочки с начальными искривлениями образующей

Хотя этот результат сам по себе не имеет для конструктора практического значения, но для нас он подтверждает целесообразность проведения дальнейших исследований СЧК круговых бочек.

В настоящей работе исследования СЧК кожухов БРЭС в виде круговых бочек проводились на основе метода МКЭ с использованием комплекса программ ANSYS. Эскиз исследованных круговых бочек представлен на рис. 6. Расчеты выполнены для стальных кожухов трех вариантов длины с одинаковым радиусом $r_1 = 100$ мм и толщиной стенок $h = 1$ мм.

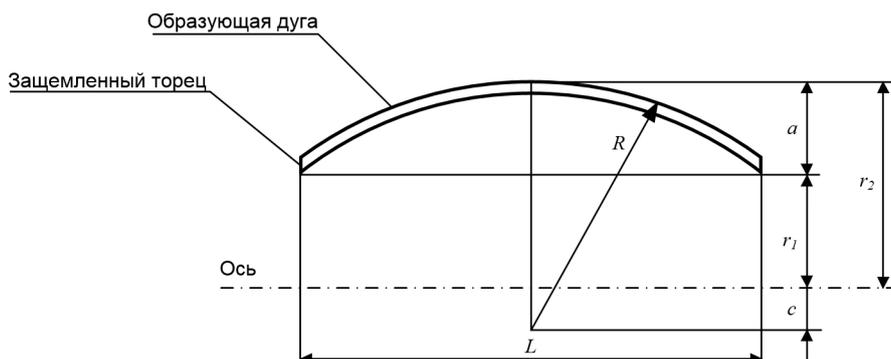


Рис. 6. Эскиз кожухов БРЭС в виде круговых бочек

Остальные размеры приведены ниже в табл. 2–4 (размеры в таблицах приведены в см), где $R = \left(a^2 + (L/2)^2 \right) / 2a$.

Таблица 2

 Геометрические характеристики кожуха длиной $L = 18$ см

Номер кожуха	r_2	$a = r_2 - r_1$	R	$c = R - r_2$
0	10	0		
1	10,5	0,5	81,25	70,75
2	11	1	41,00	30,00
3	11,5	1,5	27,75	16,25
4	12	2	21,25	9,25

Таблица 3

 Геометрические характеристики кожуха длиной $L = 24$ см

Номер кожуха	r_2	$a = r_2 - r_1$	R	$c = R - r_2$
0	10	0		
1	10,5	0,5	144,25	133,75
2	11	1	72,50	61,50
3	11,5	1,5	48,75	37,25
4	12	2	37,00	25,00

Таблица 4

 Геометрические характеристики кожуха длиной $L = 30$ см

Номер кожуха	r_2	$a = r_2 - r_1$	R	$c = R - r_2$
0	10	0		
1	10,5	0,5	225,25	214,75
2	11	1	113,00	102,00
3	11,5	1,5	75,75	64,25
4	12	2	57,25	45,25

Максимальное значение $r_2 = 120$ мм выбрано из условия ограничений по увеличению массы кожуха в пределах до 20 %.

Результат расчета с использованием комплекса программ *ANSYS* для одного из вариантов круговой бочки приведен на рис. 7.

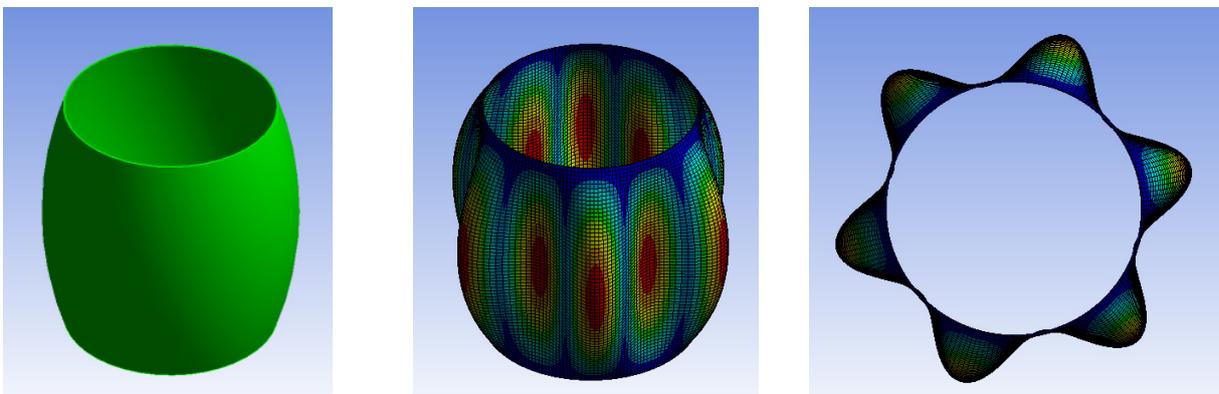


Рис. 7. Форма круговой бочки с размерами $L = 240$ мм, $r_1 = 100$ мм, $r_2 = 120$ мм и собственная форма колебаний ее основной СЧК равной $f_6 = 2460,3$ Гц

Все результаты расчетов основных СЧК круговых бочек приведены в табл. 5–7 ниже, где вариант № 0 соответствуют цилиндру и его основная СЧК обозначена $f_{ц}$.

Таблица 5

Результаты расчетов основных СЧК для кожуха длиной $L = 18$ см

Номер кожуха	r_2 , см	r_2/r_1	Масса, кг	СЧК, Гц	$f_6/f_{ц}$
0	10	1,00	0,871	1425,1	1,00
1	10,5	1,05	0,897	1850,9	1,30
2	11	1,10	0,932	2529,0	1,77
3	11,5	1,15	0,971	3273,0	2,30
4	12	1,20	1,014	4016,8	2,82

Таблица 6

Результаты расчетов основных СЧК для кожуха длиной $L = 24$ см

Номер кожуха	r_2 , см	r_2/r_1	Масса, кг	СЧК, Гц	$f_6/f_{ц}$
0	10	1,00	1,161	1089,0	1,00
1	10,5	1,05	1,195	1306,2	1,20
2	11	1,10	1,238	1637,0	1,50
3	11,5	1,15	1,285	2037,0	1,87
4	12	1,20	1,334	2460,3	2,26

Таблица 7

Результаты расчетов основных СЧК для кожуха длиной $L = 30$ см

Номер кожуха	r_2 , см	r_2/r_1	Масса, кг	СЧК, Гц	$f_6/f_{ц}$
0	10	1,00	1,451	884,0	1,00
1	10,5	1,05	1,494	997,5	1,13
2	11	1,10	1,545	1198,8	1,36
3	11,5	1,15	1,6	1443,6	1,63
4	12	1,20	1,678	1707,7	1,93

Как следует из вышеприведенных таблиц, кожух блоков БРЭС в виде круговой бочки с приемлемым на практике отношением $r_2/r_1 = 1,2$ при незначительном увеличении массы имеет основную СЧК в 2–3 раза выше, чем у цилиндрической формы.

Полученные результаты позволяют построить полуэмпирическое выражение для расчета СЧК круговых бочек.

Так, введя обозначение $K_6 = f_6/f_{ц}$ и с учетом выражения (3), формула для расчета СЧК круговых бочек будет выглядеть следующим образом:

$$f_{ц} = K_6 \frac{K_{mn}}{2\pi R} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\mu^2)}}, \quad (4)$$

где для круговых бочек с $R = r_1$ и отношением размеров $r_1/h = 100$ могут быть использованы значения K_6 , приведенные в табл. 8.

Анализ вышеприведенных результатов расчета СЧК стальных кожухов блоков БРЭС в виде круговой бочки с отношением $r_2/r_1 = 1,2$ при $r_1 = 100$ мм показывает, что при верхней границе диапазона вибрации 2000 Гц и запасе отстройки $f_0/f \geq 2$, считать безрезонансным можно только вариант кожуха с длиной $L = 180$ мм. Для кожухов при $L > 180$ мм повышение СЧК может быть достигнуто увеличением отношения r_2/r_1 или, например, с использованием кольцевого ребра, расположенного в середине длины круговой бочки.

Пробный расчет СЧК с использованием комплекса программ ANSYS выполнен для круговой бочки с поперечным кольцевым ребром, эскиз которой представлен на рис. 8.

Значение K_6 для различных соотношений r_2/r_1 и L/r_1

$K_6 = f_6/f_u$	$r_1/h = 100$	r_2/r_1				
		1	1,05	1,1	1,15	1,2
L/r_1	1,5	1	1,359	1,956	2,585	3,185
	1,6	1	1,338	1,891	2,484	3,056
	1,7	1	1,318	1,830	2,388	2,934
	1,8	1	1,298	1,773	2,297	2,818
	1,9	1	1,280	1,719	2,212	2,709
	2,0	1	1,262	1,668	2,132	2,606
	2,1	1	1,245	1,621	2,057	2,510
	2,2	1	1,229	1,577	1,988	2,419
	2,3	1	1,213	1,537	1,924	2,336
	2,4	1	1,199	1,500	1,865	2,259
	2,5	1	1,185	1,467	1,812	2,188
	2,6	1	1,172	1,437	1,764	2,124
	2,7	1	1,159	1,410	1,721	2,066
	2,8	1	1,148	1,387	1,684	2,014
	2,9	1	1,137	1,367	1,652	1,970
3	1	1,127	1,351	1,625	1,931	

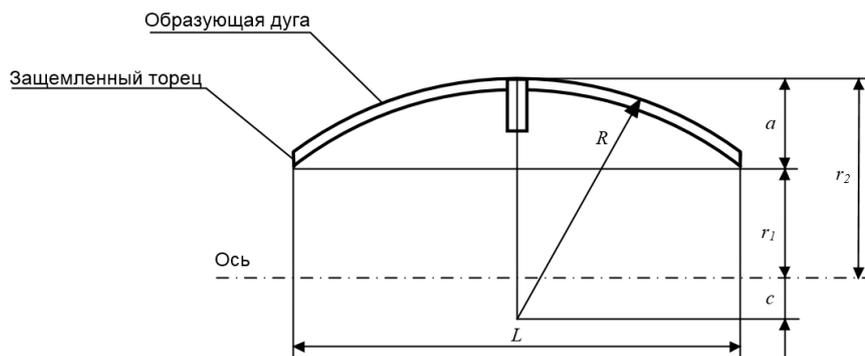


Рис. 8. Эскиз круговой бочки с ребром

На рис. 9 приведены результаты расчетов для ранее приведенной круговой бочки 2-го варианта при $L = 240$ мм, $r_2/r_1 = 1,2$ и ребром с толщиной $H = 2$ мм и высотой ребра $l = 20$ мм.

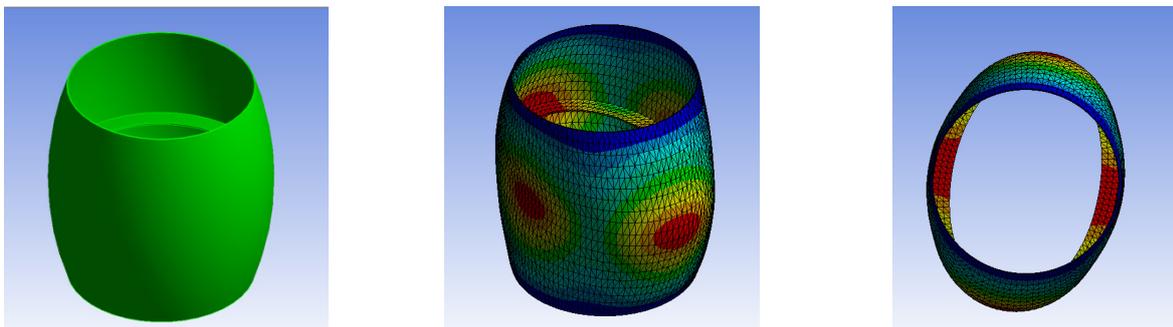


Рис. 9. Форма круговой бочки с кольцевым ребром и собственная форма колебаний ее основной СЧК равной $f_6 = 2878,7$ Гц

Исходя из результатов расчета, можно сделать вывод, что при верхней границе диапазона вибрации 2000 Гц и запасе отстройки $f_0/f \geq 2$ рассматриваемый вариант кожуха не является безрезонансным и должен быть отклонен. Такой вывод показывает, какую важную роль играет нормативный уровень запаса отстройки для выбора оптимального конструкторского решения при создании безрезонансных конструкций и какую отрицательную роль играет его завышенная величина.

То, что используемый запас отстройки $f_0/f \geq 2$ завышен, показано в работе [6]. Здесь для плат из стеклотекстолита экспериментально найдена величина запаса отстройки $f_0/f \geq 1,2 \dots 1,3$. В судостроении применяется почти такой же запас отстройки $f_0/f \geq 1,25 \dots 1,3$ [7]. При таких уровнях запаса отстройки рассматриваемый кожух с поперечным кольцевым ребром будет считаться безрезонансным и использован при проектировании.

Учитывая важность для принятия оптимальных конструктивных решений при создании безрезонансных конструкций, проблема величины запаса отстройки требует дополнительных исследований.

Заключение

1. В настоящей работе выполнено исследование СЧК тонкостенных кожухов для блоков БРЭС в виде круговых бочек.

2. На основе проведенных исследований даны рекомендации по определению основных СЧК кожухов в виде круговых бочек и выбору на ранних стадиях проектирования конструктивных решений по созданию безрезонансных конструкций.

3. Выполненные расчеты с использованием комплекса программ *ANSYS* показали важность компьютерного моделирования в исследованиях технически сложных задач конструирования надежных БРЭС.

Список литературы

1. Талицкий Е. Н. Защита электронных средств от механических воздействий. Владимир : ВГУ, 2001.
2. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М. : Наука, 1967.
3. Карпушин В. Б. Вибрации и удары в радиоаппаратуре. М. : Советское радио, 1971.
4. Фролов С. И., Данилова Е. А., Таньков Г. В. [и др.]. Разработка методики определения резонансных частот тонкостенных цилиндрических конструкций бортовых радиоэлектронных средств // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 102–113. doi: 10.21685/2307-4205-2021-1-10
5. Кармишин А. В. [и др.]. Статика и динамика тонкостенных оболочечных конструкций. М. : Машиностроение, 1975.
6. Ухин В. А. Автоматизация проектирования виброзащиты электронной аппаратуры методом частотной отстройки. Владимир, 2007.
7. Пилипенко В. В., Переверзев Е. С., Федоров В. М. Коэффициенты безопасности и прочность конструкций // Техническая механика. 2009. № 1.
8. Таньков Г. В., Трусов В. А. Модельные и стендовые методы определения амплитудно-частотных характеристик плат БРЭА // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2019. Т. 1. С. 304–307.
9. Данилова Е. А., Таньков Г. В., Трусов В. А. [и др.]. Исследование динамики печатных плат радиоэлектронных средств : монография. Пенза : Изд-во ПГУ, 2016. 116 с.
10. Таньков Г. В., Юрков Н. К., Данилова Е. А. К вопросу построения конечно-разностных моделей пластинчатых конструкций РЭС : итоги прошлого и проблемы настоящего века. 2022. Т. 11, № 1. С. 39–42.
11. Рыбаков И. М., Гришко А. К., Кочегаров И. И. Выбор и обоснование способов защиты сложных изделий РЭА от виброперегрузок // Современные информационные технологии. 2018. № 28. С. 56–60.
12. Свободные колебания круговой цилиндрической оболочки, заземленной по торцам. URL: scadsoft.com/tests_scad/index/test/77
13. Юрков Н. К., Михайлов В. С., Трусов В. А. Оценка и прогнозирование остаточного ресурса по результатам биномиальных испытаний, не давших отказы // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 3. С. 62–69. doi: 10.21685/2307-4205-2019-3-7
14. Дяченко И. А., Миронов А. А., Свердлик Ю. М. Сравнительный анализ теории и конечно-элементных моделей расчета свободных колебаний цилиндрических оболочек // Транспортные системы. 2019. № 39.

References

1. Talitskiy E.N. *Zashchita elektronnykh sredstv ot mekhanicheskikh vozdeystviy = Protection of electronic means from mechanical influences*. Vladimir: VGU, 2001. (In Russ.)
2. Bronshteyn I.N., Semendyaev K.A. *Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov = Handbook of Mathematics for engineers and students of higher education institutions*. Moscow: Nauka, 1967. (In Russ.)
3. Karpushin V.B. *Vibratsii i udary v radioapparature = Vibrations and shocks in radio equipment*. Moscow: Sovetskoe radio, 1971. (In Russ.)

4. Frolov S.I., Danilova E.A., Tan'kov G.V. [et al.]. Development of a methodology for determining the resonant frequencies of thin-walled cylindrical structures of onboard radio-electronic means. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(1):102–113. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-1-10
5. Karmishin A.V. [et al.]. *Statika i dinamika tonkostennykh obolocheknykh konstruksiy = Statics and dynamics of thin-walled shell structures*. Moscow: Mashinostroenie, 1975. (In Russ.)
6. Ukhin V.A. *Avtomatizatsiya proektirovaniya vibrozashchity elektronnoy apparatury metodom chastotnoy otstroyki = Automation of design of vibration protection of electronic equipment by the method of frequency tuning*. Vladimir, 2007. (In Russ.)
7. Pilipenko V.V., Pereverzev E.S., Fedorov V.M. Safety coefficients and structural strength. *Tekhnicheskaya mekhanika = Technical Mechanics*. 2009;(1). (In Russ.)
8. Tan'kov G.V., Trusov V.A. Model and bench methods for determining the amplitude-frequency characteristics of BRAA boards. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2019;1:304–307. (In Russ.)
9. Danilova E.A., Tan'kov G.V., Trusov V.A. [et al.]. *Issledovanie dinamiki pechatnykh plat radioelektronnykh sredstv: monografiya = Investigation of the dynamics of printed circuit boards of electronic means : monograph*. Penza: Izd-vo PGU, 2016:116. (In Russ.)
10. Tan'kov G.V., Yurkov N.K., Danilova E.A. On the issue of constructing finite-difference models of plate structures of RES. *KhKhI: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego veka = XXI: results of the past and problems of the present century*. 2022;11(1):39–42. (In Russ.)
11. Rybakov I.M., Grishko A.K., Kochegarov I.I. The choice and justification of ways to protect complex REA products from vibration overload. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii = Modern information technologies*. 2018;(28):56–60. (In Russ.)
12. *Svobodnye kolebaniya krugovoy tsilindricheskoy obolochki, zashchemlennoy po tortsam = Free vibrations of a circular cylindrical shell, pinched at the ends*. (In Russ.). Available at: scadsoft.com/tests_scad/index/test/77
13. Yurkov N.K., Mikhaylov V.S., Trusov V.A. Evaluation and prediction of the residual resource based on the results of binomial tests that did not give failures. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2019;(3):62–69. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2019-3-7
14. Dyachenko I.A., Mironov A.A., Sverdlik Yu.M. Comparative analysis of the theory and finite element models for calculating free vibrations of cylindrical shells. *Transportnye sistemy = Transport systems*. 2019;(39). (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Иванович Фролов

кандидат технических наук,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: sfrolov46@mail.ru

Евгения Анатольевна Данилова

кандидат технических наук,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: siori@list.ru

Георгий Васильевич Таньков

кандидат технических наук,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: g.tankov43@mail.ru

Sergei I. Frolov

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Evgeniya A. Danilova

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Georgiy V. Tan'kov

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Игорь Иванович Кочегаров

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

Алексей Владимирович Лысенко

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

Igor' I. Kochegarov

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Alexey V. Lysenko

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 15.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 10.01.2022

Принята к публикации/Accepted 15.02.2022

ANISOTROPIC MODEL OF THE SYSTEM FOR MONITORING AND CONTROLLING THE THERMAL PARAMETERS OF BOARD RADIO MODULES

A.K. Grishko

Penza State University, Penza, Russia
Alexey-grishko@rambler.ru

Abstract. *Background.* In accordance with the modern doctrine of the development of the latest rocket and space technology, the control and management of systems of onboard radio-electronic equipment is extremely important. Increasing requirements for reliability and increasing the density of deployment of radio-electronic means for various purposes, especially on-board equipment, significantly limits the possibility of heat removal using ventilation and convection in multi-level radio-electronic modules. At the same time, the conductive method of heat removal involves the use of thermal maintenance systems, special heat-exchange materials for sealing elements of radio-electronic devices. In many cases, an unbalanced temperature regime leads to an increase in the error of the sensors, which leads to a violation of the stability of the entire complex of rocket and space technology. The aim of the study is to analyze and develop mathematical models of heat transfer processes in radio-electronic modules that have analytical solutions. *Materials and methods.* A mathematical model for the analysis and provision of the thermal regime in radio-electronic modules in the form of a quasi-homogeneous anisotropic parallelepiped with stationary volumetric or flat heat sources placed in a conditional environment with a stable temperature is proposed. *Results and conclusions.* This approach makes it possible to implement the following procedures: complex spatial arrangement replacement of heat sources with simpler ones; multicomponent subsystems with a heterogeneous structure are replaced by quasi-homogeneous regions with effective values of heat transfer properties; spatial arrangement of quantities describing heat transfer processes at the edges of areas replaced their average values. The proposed approach makes it possible to significantly simplify the calculated value of the temperature and these models can be widely used to calculate, measure and analyze thermal regimes in radio-electronic modules with a high density of radio-electronic equipment and are a convenient tool for thermophysical design and ensuring stable operation of on-board radio equipment of rocket-space and special equipment.

Keywords: anisotropic model, board radio modules, thermal management

For citation: Grishko A.K. Anisotropic model of the system for monitoring and controlling the thermal parameters of board radio modules. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(2):25–32. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-2-3

АНИЗОТРОПНАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ ПАРАМЕТРАМИ БОРТОВЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

А. К. Гришко

Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
Alexey-grishko@rambler.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В соответствии с современной доктриной развития новейшей ракетно-космической техники чрезвычайно важен контроль и управление системами бортовой радиоэлектронной аппаратуры. Повышение требований к надежности и увеличение плотности размещения радиоэлектронных средств различного назначения, особенно бортового оборудования, существенно ограничивают возможность отвода тепла с помощью вентиляции и конвекции в многоуровневых радиоэлектронных модулях. В то же время кондуктивный метод отвода тепла предполагает применение систем поддержания теплового режима, специальных теплообменных материалов для герметизации элементов радиоэлектронных устройств. Во многих случаях несбалансированный температурный режим приводит к увеличению погрешности работы датчиков, что приводит к нарушению стабильности работы всего комплекса ракетно-космической техники. Целью исследования является анализ и разработка математических моделей процессов теплообмена в радиоэлек-

тронных модулях, имеющих аналитические решения. *Материалы и методы.* Предложена математическая модель анализа и обеспечения теплового режима в радиоэлектронных модулях в виде квазиоднородного анизотропного параллелепипеда со стационарными объемными или плоскими источниками тепла, размещенными в окружающей условной среде со стабильной температурой. *Результаты и выводы.* Такой подход дает возможность реализовать следующие процедуры: сложное пространственное распределение источников тепла заменяются на более простые; многокомпонентные подсистемы с неоднородной структурой заменяются на квазиоднородные области с эффективными значениями теплообменных свойств; пространственное распределение величин, описывающих процессы теплообмена на краях областей, заменяются на их средние значения. Предлагаемый подход позволяет существенно упростить расчетное значение полей температуры и эти модели могут широко применяться для расчета, измерения и анализа тепловых режимов в радиоэлектронных модулях с высокой плотностью компоновки радиоэлектронной аппаратуры и является удобным инструментом для теплофизического конструирования и обеспечения стабильной работы бортовой радиоаппаратуры ракетно-космической и специальной техники.

Ключевые слова: анизотропная модель, бортовые радиомодули, терморегулирование

Для цитирования: Гришко А. К. Анизотропная модель системы контроля и управления тепловыми параметрами бортовых радиоэлектронных модулей // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 25–32. doi:10.21685/2307-4205-2022-2-3

Introduction

Radio equipment of different purpose refers to complex engineering systems and typically constitute a modular hierarchical structure. High density of arrangement of radio-electronic equipment limits significantly the possibility of heat removal by means of ventilation and convection in multi-level structural modules. The engineering solutions that do not pay due attention to the efficiency of heat removal, decrease the efficiency and accuracy of the equipment operation and can significantly lower its service life. In this situation, the conductive method of heat removal, that suggests the use of the systems of thermal management, special heat-exchange materials for sealing elements of radio-electronic equipment. Optimum solutions for heat removal can be achieved by various means – analytical calculations, laboratory physical modelling; mathematical modelling, including with the use of analytical solutions and computer simulation.

General overview of research problem

Hierarchical geometrical model of radio system with high density of structural modules arrangements can be represented, according to [1–4] as a certain total of parallelepipeds and plates in an enclosed space with different types of attachment to each other and different orientation. The outer surface of this total of bodies is the border with the external environment (external surface) [4–6].

Let us assume that in a system under analysis randomly distributed in space heat sources are in action and have content intensity over time period. The input ventilation and corresponding heat outlets are absent. As a lot of elements in this enclosed space are close in their structure, the heat exchange can be described on the basis of the model with distributed parameters. Characteristics for heat propagation within the system are the coefficient values of effective heat exchange. The coefficient values will depend on physical properties of the system, material of the bearing structure; geometrical forms; conditions accompanying the mutual heat exchange between structural modules. The coefficients are calculated using the pattern for long-range order systems, i.e. for one elementary unit [3–6]. A structural module and adjacent space – air, parts of mounting and bearing structure – are considered as an elementary unit.

This approach to modelling can be also applied to objects with some deviations from long-range order, local geometrical and heat-transfer properties. System thermal conditions will be influenced by environment and other objects of the systems which emit heat: supports, sections, blocks etc. [1–3, 6]. It can be assumed that the object under study is placed in a certain ‘conventional’ environment, at a calculated temperature t_{conv} , taking into consideration all temperature influences. Heat exchange with the external environment proceeds according to Newton’s law [4, 5], with each surface of the external area characterized by corresponding heat exchange coefficients α .

This model is then applied gradually according to the descending order of modelling heat exchange in structural modules of RS. In the model of the analyzed structure the low-level structural modules with power evenly distributed in space are counted as heat sources.

Heat sources in different structural modules have different forms, according to these features the models can be differentiated and classified [1–3, 6]. For example, separate models in heated areas of sup-

port without ventilation are classified according to the following forms of heat sources: rectangle, parallelepiped with parameters equal the model size; parallelepiped with parameters differing from the model size.

In the research, conducted by the authors, in line with [6–8] the complex of new models was developed on the basis of this approach. These include support areas experiencing heat, sections, modules with high density of element arrangement; micro-modules with compound cover; PCBs with flat surface elements.

Support areas experiencing heat, sections, devices are shown as the total of structural modules of low levels (sections, blocks) that have high density of arrangement of bearing structure and air gaps between them. The conventional environment for heated areas is considered to include parts of the structure (external coating of supports and devices), adjacent air, whose external surfaces experience heat transfer and whose temperature values were calculated at preceding modelling stages. The conventional environment for PCBs and microassemblies is considered to include surface of the screen, cover (if present) and surfaces of the neighboring (including the bearing microassemblies) of PCBs, cover walls, air inside blocks, sections, devices where they are positioned.

To conduct the analysis of thermal conditions, RS support in particular, thermal model for structural modules [6,8,9], that has the form of homogeneous anisotropic parallelepiped, consisting of 3D heat sources – blocks. It has to be noted, that the resultant model with accepted limitations and allowances, including those imposed by the chosen methods of solution, does not have a wide sphere of application. As the object has to be given in the form close to the plate, the depth of all heat sources must be the same and equal the total depth. It is also impossible to set different conditions characterizing heat exchange at external surfaces.

Considering the above mentioned drawbacks, it is worthwhile to develop an improved model, free of the limitations mentioned earlier.

The development of the mathematical model

As the studied models of objects are different from each other not only in forms of heat sources, the general model of structural modules with high density of arrangement can be presented in the form of quasi-homogeneous anisotropic parallelepiped with different-size stationary 3D (parallelepipeds) or flat (rectangles) heat sources that are located in the conventional environment with stable temperature.

We will be looking for the solution of the problem on stationary temperature field of quasi-homogeneous parallelepiped. Let us analyze the linear problem in which heat exchange parameters of internal and external heat transfer of the model $(\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z, \alpha)$ are considered unaffected by temperature. Using the principle of superpositioning of temperature fields we obtain a mathematical expression that looks as follows:

$$t_j = t_{conv} + \sum_{i=1}^N \vartheta_{ij}$$

where t_j is the temperature in j point (area) of the parallelepiped; ϑ_{ij} is the heat over the environment temperature obtained in j -th point as a result of i -th heat source; N is the number of heat sources.

Thus, the main problem can practically be reduced to the determining the temperature field in a parallelepiped, induced as a result of the activities of each source. Stationary temperature field in this case is described by differential equation of the heat exchange (index i is later dropped):

$$\lambda_x \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial z^2} + W \cdot 1\{S\} = 0 \quad (1)$$

with the following boundary conditions:

$$\left[\frac{\partial \vartheta}{\partial n} - \frac{\alpha_{0n}}{\lambda_n} \vartheta \right]_{n=0} = 0, \quad (2)$$

$$\left[\frac{\partial \vartheta}{\partial n} - \frac{\alpha_{1n}}{\lambda_n} \vartheta \right]_{n=L_n} = 0,$$

$$n = x, y, z$$

where ϑ is the overheating relatively the environment temperature, induced in point (x, y, z) of the model by i -th heat source; $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ are coefficients of heat-exchange efficiency of the model; $W = \frac{P}{8\Delta a \Delta b \Delta c}$ is the volume specific power of the source;

$$1\{S\} = \begin{cases} 1 - \text{in } S \text{ area under the influence of the source,} \\ 0 - \text{outside } S \text{ area,} \end{cases}$$

α_{0n}, α_{1n} – heat transfer coefficient on the faces of the parallelepiped when $n=0$ and $n=L_n$ correspondingly.

Using the approximate analytical method [5, 8–12, 15–18] we get solutions for the equations (1) and (2).

The choice of the solution method was based on the following criteria:

- precision that is necessary for engineering calculations;
- small amount of work required to learn it and the process of solving the problem;
- the solution of the problem must result in the form which is suitable for further analysis of temperature field, so that to ensure possibility to analyze any overheating, induced by each separate source;
- the form of the problem solution must be suitable for further development of algorithms and computer programs;
- the resultant mathematical expression must be easily subjected to coordinate integration, so as to obtain data of surface-average and volume-average temperatures, which may be used as input data in the form, for example, of limiting conditions, at further stages of modelling.

The final expression for the model temperature field with one heat source will look as follows:

$$\vartheta(x, y, z) = P \cdot F(x, y, z)$$

where $F(x, y, z) = f_0, f_x, f_y, f_z$, is the heat coefficient,

$$f_0 = \frac{L_z p_x p_y p_z}{8\lambda_z L_x L_y} \left[\begin{array}{l} H_x H_y p_z (B_{i0z} A_{z1} + B_{i1z} A_{z2}) + \\ + H_x H_z p_y E_y (B_{i0y} A_{y1} + B_{i1y} A_{y2}) + \\ + H_y H_z p_x E_x (B_{i0x} A_{x1} + B_{i1x} A_{x2}) \end{array} \right]^{-1}; \quad (3)$$

$$f_n = \begin{cases} A_{n1} \left(e^{p_n \bar{n}} (1 + B_{i0n} / p_n) + e^{-p_n \bar{n}} (1 - B_{i0n} / p_n) \right) \\ \quad \text{при } \bar{n} \in [0, \bar{\alpha} - \Delta \bar{\alpha}]; \\ (1 + B_{i0n} / p_n) (1 - B_{i1n} / p_n) e^{p_n (\bar{n} - 1 + \bar{\alpha})} + \\ \quad + (1 + B_{i1n} / p_n) (1 - B_{i0n} / p_n) e^{-p_n (\bar{n} - 1 + \bar{\alpha})} + \varphi_n \\ \quad \text{при } \bar{n} \in [\bar{\alpha} - \Delta \bar{\alpha}, \bar{\alpha} + \Delta \bar{\alpha}]; \\ A_{n2} \left(e^{p_n (1 - \bar{n})} (1 + B_{i0n} / p_n) + e^{-p_n (1 - \bar{n})} (1 - B_{i1n} / p_n) \right) \\ \quad \text{при } \bar{n} \in [\bar{\alpha} + \Delta \bar{\alpha}]. \end{cases} \quad (4)$$

In expressions (3) and (4) the following designations are used: $n = x, y, z$; $\bar{n} = \frac{n}{L_n}$; $\bar{\alpha} = \overline{a, b, c}$;

$\overline{\alpha} = \overline{\Delta a, \Delta b, \Delta c}$ is accordingly when $n = x, y, z$:

$$\bar{a} = \frac{a}{L_x}, \bar{b} = \frac{b}{L_y}, \bar{c} = \frac{c}{L_z}; \Delta \bar{a} = \frac{\Delta a}{L_x}, \Delta \bar{b} = \frac{\Delta b}{L_y}, \Delta \bar{c} = \frac{\Delta c}{L_z}. \quad (5)$$

Biot number [4]:

$$B_{i0n} = \alpha_{0n} L_n / \lambda_n, B_{i1n} = \alpha_{1n} L_n / \lambda_n, E_n = \lambda_n L_z^2 / \lambda_z L_n^2, \\ A_{n1} = (B_{i1n} / p_n + 1) e^{p_n (1 - \bar{\alpha})} - (B_{i1n} / p_n - 1) e^{-p_n (1 - \bar{\alpha})},$$

$$\begin{aligned}
 A_{n2} &= (B_{i0n} / p_n + 1)e^{p_n \bar{\alpha}} - (B_{i1n} / p_n - 1)e^{-p_n \bar{\alpha}}, \\
 H_n &= (B_{i0n} / p_n + 1)e^{-p_n} \left[(B_{i0n} / p_n + 1)h_n - B_{i0n} / p_n e^{-p_n \bar{\alpha}} \right] + \\
 &+ e^{-p_n} (B_{i1n} / p_n - 1) \left[B_{i0n} / p_n e^{p_n \bar{\alpha}} - (B_{i0n} / p_n - 1)h_n \right] - B_{i1n} / p_n A_{n2}, \\
 \varphi_n &= \frac{\left[e^{p_n} (B_{i0n} / p_n + 1)(B_{i1n} / p_n + 1)(1 - ch p_n (\bar{n} - \bar{\alpha}))e^{-p_n \Delta \bar{\alpha}} - \right. \\
 &\left. - e^{p_n} (B_{i0n} / p_n - 1)(B_{i1n} / p_n - 1)(1 - ch p_n (\bar{n} - \bar{\alpha}))e^{p_n \Delta \bar{\alpha}} \right]}{sh p_n \Delta \bar{\alpha}}, \\
 h_n &= \begin{cases} 1 & \text{in } \bar{\alpha} = 0, \\ p_n \Delta \bar{\alpha} / sh p_n \Delta \bar{\alpha} & \text{in } \bar{\alpha} \neq 0, \end{cases}
 \end{aligned}$$

p_x, p_y, p_z – parameters are roots of transcendental equations.

Conclusion

It should be noted that in case the model was used at the ‘support’ hierarchical level [9, 10–14], then for such multi-component system the coefficients of heat exchange are ‘summed’ and the information is accumulated on heat-exchange and structural properties of lower-level structural modules [15–18], that are still under development by engineers. This means that values of these coefficients can be obtained from CAD databases as statistical average for base bearing structures. They can be preliminary calculated using data for parameters of the standard design of modules (sections, blocks) [1–3, 17–19]. The developed models are used in the engineering process for specific RS, that make use of advanced electronics articles and bearing structures. Apart from that, with their help it is possible to predict thermal processes in RS and their structural modules at early stages of design.

References

1. Mikheev M.Yu., Zhashkova T.V., Shcherban A.B. [et al.]. Generalized structural models of complex distributed objects. *2016 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. Yerevan, Armenia, 2016:1–4. doi:10.1109/EWDTS.2016.7807742
2. Mikheev M.Yu., Zhashkova T.V., Meshcheryakova E.N. [et al.]. Imitation modelling for the subsystem of identification and structuring data of signal sensors. *2016 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. Yerevan, Armenia, 2016:1–5. doi:10.1109/EWDTS.2016.7807748
3. Grishko A. Parameter control of radio-electronic systems based of analysis of information conflict. *2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*. Novosibirsk, Russia, 2016;02:107–111. doi:10.1109/APEIE.2016.7806423
4. Grishko A.K., Goryachev N.V., Kochegarov I.I., Kalaev M.P. Mathematical models of the system of measurement and analysis of temperature parameters of radio electronic modules. *2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*. Novosibirsk, Russia, 2016;02:112–115. doi:10.1109/APEIE.2016.7806424
5. Grishko A., Kochegarov I., Yurkov N. Structural and Parameter Optimization of the System of Interconnected Processes of Building Complex Radio-Electronic Devices. *2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*. Polyana, Svalyava, (Zakarpattya), Ukraine, 2017:192–194. doi:10.1109/CADSM.2017.7916112
6. Grishko A., Yurkov N., Goryachev N. Reliability Analysis of Complex Systems Based on the Probability Dynamics of Subsystem Failures and Deviation of Parameters. *2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*. Polyana, Svalyava, (Zakarpattya), Ukraine, 2017:179–182. doi:10.1109/CADSM.2017.7916109
7. Rybakov I.M., Goryachev N.V., Kochegarov I I. [et al.]. Application of the Model of the Printed Circuit Board with Regard to the Topology of External Conductive Layers for Calculation of the Thermal Conditions of the Printed Circuit Board. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017;803(1):1–6. doi:10.1088/1742-6596/803/1/012130

8. Grishko A.K., Kochegarov I.I., Goryachev N.V. Multi-criteria Optimization of the Structure of Radio-electronic System in Indeterminate Conditions. *2017 KhKh IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*. Saint Petersburg, Russia, 2017:210–212. doi:10.1109/SCM.2017.7970540
9. Ostreikovskiy V.A., Shevchenko Ye.N., Yurkov N.K. [et al.]. Time Factor in the Theory of Anthropogenic Risk Prediction in Complex Dynamic Systems. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018;944(1):1–10. doi:10.1088/1742-6596/944/1/012085
10. Grishko A., Danilova E., Rybakov I. [et al.]. Multicriteria Selection of the Optimal Variant of a Complex System Based on the Interval Analysis of Fuzzy Input Data. *2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT)*. Moscow, Russia, 2018:1–7. doi:10.1109/MWENT.2018.8337237
11. Lysenko A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K., Grishko A.K. Optimizing structure of complex technical system by heterogeneous vector criterion in interval form. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018;1015(4):1–6. doi:10.1088/1742-6596/1015/4/042032
12. Grishko A., Adnreev P., Goryachev N. [et al.]. Reliability control of complex systems at different stages of their life cycle. *Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2018*. Yekaterinburg, Russia, 2018:220–223. doi:10.1109/USBEREIT.2018.8384589
13. Yurkov N.K., Grishko A.K., Lysenko A.V. [et al.]. Intellectual Method for Reliability Assessment of Radio-Electronic Means. *International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2018*. Saratov, Russia, 2018:105–112. doi:10.1109/APEDE.2018.8542360
14. Artamonov D.V., Grishko A.K., Litvinov A.N. [et al.]. Modeling and Dynamic Analysis of the Structure Parameters of Radio-Electronic Modules Based on the Method of Autonomous Blocks. *International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2018*. Saratov, Russia, 2018:180–187. doi:10.1109/APEDE.2018.8542289
15. Andreev P., Yurkov N., Grishko A. [et al.]. Study of Dielectric Effect on Signal Propagation in the Gigahertz Range at Elevated Temperature. *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2019)*. Saint-Petersburg, Russia, 2019. doi:10.1109/WECONF.2019.8840587
16. Andreyev P., Grishko A., Yurkov N. The Temperature Influence on the Propagation Characteristics of the Signals in the Printed Conductors. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science : proceedings of the XIIIth International Conference TCSET'2016*. Lviv-Slavsko, Ukraine, 2016. doi:10.1109/TCSET.2016.7452063
17. Grishko A., Lysenko A., Yurkov N. [et al.]. Stochastic Model of Parametric Prediction of Reliability of Radio-Electronic Systems. *Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT)*. Yekaterinburg, Russia, 2019:432–435. doi:10.1109/USBEREIT.2019.8736570
18. Grishko A., Goryachev N., Kochegarov I. [et al.]. Management of Structural Components Complex Electronic Systems on the Basis of Adaptive Model. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science : proceedings of the XIIIth International Conference TCSET'2016*. Lviv-Slavsko, Ukraine, 2016. doi:10.1109/TCSET.2016.7452017
19. Grishko A., Goryachev N., Yurkov N. Adaptive Control of Functional Elements of Complex Radio Electronic Systems. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2015;10(23):43842–43845.

Список литературы

1. Mikheev M. Yu., Zhashkova T. V., Shcherban A. B. [et al.]. Generalized structural models of complex distributed objects // 2016 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). Yerevan, Armenia, 2016. P. 1–4. doi:10.1109/EWDTS.2016.7807742
2. Mikheev M. Yu., Zhashkova T. V., Meshcheryakova E. N. [et al.]. Imitation modelling for the subsystem of identification and structuring data of signal sensors // 2016 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). Yerevan, Armenia, 2016. P. 1–5. doi:10.1109/EWDTS.2016.7807748
3. Grishko A. Parameter control of radio-electronic systems based of analysis of information conflict // 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). Novosibirsk, Russia, 2016. Vol. 02. P. 107–111. doi:10.1109/APEIE.2016.7806423
4. Grishko A. K., Goryachev N. V., Kochegarov I. I., Kalaev M. P. Mathematical models of the system of measurement and analysis of temperature parameters of radio electronic modules // 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). Novosibirsk, Russia, 2016. Vol. 02. P. 112–115. doi:10.1109/APEIE.2016.7806424
5. Grishko A., Kochegarov I., Yurkov N. Structural and Parameter Optimization of the System of Interconnected Processes of Building Complex Radio-Electronic Devices // 2017 14th International Conference The Experience

- of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM). Polyana, Svalyava, (Zakarpattia), Ukraine, 2017. P. 192–194. doi:10.1109/CADSM.2017.7916112
6. Grishko A., Yurkov N., Goryachev N. Reliability Analysis of Complex Systems Based on the Probability Dynamics of Subsystem Failures and Deviation of Parameters // 2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM). Polyana, Svalyava, (Zakarpattia), Ukraine, 2017. P. 179–182. doi:10.1109/CADSM.2017.7916109
 7. Rybakov I. M., Goryachev N. V., Kochegarov I. I. [et al.]. Application of the Model of the Printed Circuit Board with Regard to the Topology of External Conductive Layers for Calculation of the Thermal Conditions of the Printed Circuit Board // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 803, № 1. P. 1–6. doi:10.1088/1742-6596/803/1/012130
 8. Grishko A. K., Kochegarov I. I., Goryachev N. V. Multi-criteria Optimization of the Structure of Radio-electronic System in Indeterminate Conditions // 2017 XX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM). Saint Petersburg, Russia, 2017. P. 210–212. doi:10.1109/SCM.2017.7970540
 9. Ostreikovskiy V. A., Shevchenko Ye. N., Yurkov N. K. [et al.]. Time Factor in the Theory of Anthropogenic Risk Prediction in Complex Dynamic Systems // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 944, iss. 1. P. 1–10. doi:10.1088/1742-6596/944/1/012085
 10. Grishko A., Danilova E., Rybakov I. [et al.]. Multicriteria Selection of the Optimal Variant of a Complex System Based on the Interval Analysis of Fuzzy Input Data // 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT), Moscow, Russia, 2018. P. 1–7. doi:10.1109/MWENT.2018.8337237
 11. Lysenko A. V., Kochegarov I. I., Yurkov N. K., Grishko A. K. Optimizing structure of complex technical system by heterogeneous vector criterion in interval form // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1015, iss. 4. P. 1–6. doi:10.1088/1742-6596/1015/4/042032
 12. Grishko A., Adnreev P., Goryachev N. [et al.]. Reliability control of complex systems at different stages of their life cycle // Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2018. Yekaterinburg, Russia, 2018. P. 220–223. doi:10.1109/USBEREIT.2018.8384589
 13. Yurkov N. K., Grishko A. K., Lysenko A. V. [et al.]. Intellectual Method for Reliability Assessment of Radio-Electronic Means // International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2018, Saratov, Russia, 2018. P. 105–112. doi:10.1109/APEDE.2018.8542360
 14. Artamonov D. V., Grishko A. K., Litvinov A.N. [et al.]. Modeling and Dynamic Analysis of the Structure Parameters of Radio-Electronic Modules Based on the Method of Autonomous Blocks // International Conference on Actual Problems of Electron Devices Engineering, APEDE 2018. Saratov, Russia, 2018. P. 180–187. doi:10.1109/APEDE.2018.8542289
 15. Andreev P., Yurkov N., Grishko A. [et al.]. Study of Dielectric Effect on Signal Propagation in the Gigahertz Range at Elevated Temperature // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF 2019). Saint-Petersburg, Russia, 2019. doi:10.1109/WECONF.2019.8840587
 16. Andreyev P., Grishko A., Yurkov N. The Temperature Influence on the Propagation Characteristics of the Signals in the Printed Conductors // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science : proceedings of the XIIIth International Conference TCSET'2016. Lviv-Slavsko, Ukraine, 2016. doi:10.1109/TCSET.2016.7452063
 17. Grishko A., Lysenko A., Yurkov N. [et al.]. Stochastic Model of Parametric Prediction of Reliability of Radio-Electronic Systems // Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology (USBEREIT). Yekaterinburg, Russia, 2019. P. 432–435. doi:10.1109/USBEREIT.2019.8736570
 18. Grishko A., Goryachev N., Kochegarov I. [et al.]. Management of Structural Components Complex Electronic Systems on the Basis of Adaptive Model // Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science : proceedings of the XIIIth International Conference TCSET'2016. Lviv-Slavsko, Ukraine, 2016. doi:10.1109/TCSET.2016.7452017
 19. Grishko A., Goryachev N., Yurkov N. Adaptive Control of Functional Elements of Complex Radio Electronic Systems // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10, № 23. P. 43842–43845.

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Константинович Гришко

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: Alexey-grishko@rambler.ru

Aleksey K. Grishko

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 06.07.2021

Поступила после рецензирования/Revised 08.08.2021

Принята к публикации/Accepted 14.08.2021

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

УДК 519.24:53

doi:10.21685/2307-4205-2022-2-4

ОБЗОР НОВЫХ СТАТИСТИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ ПРОВЕРКИ ГИПОТЕЗЫ НОРМАЛЬНОСТИ И РАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДАННЫХ МАЛЫХ ВЫБОРОК

А. П. Иванов¹, А. И. Иванов², А. В. Безяев³, Е. Н. Куприянов⁴,
А. Г. Банных⁵, К. А. Перфилов⁶, В. С. Лукин⁷, К. Н. Савинов⁸,
С. А. Полковникова⁹, Ю. И. Серикова¹⁰, А. Ю. Малыгин¹¹

^{1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

² Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт, Пенза, Россия

¹ ap_ivanov@pnzgu.ru, ² ivan@pniei.penza.ru, ^{3, 4, 5, 6, 8} tsib@pnzgu.ru,

⁷ ibst@pnzgu.ru, ^{9, 10} vt@pnzgu.ru, ¹¹ mal890@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается проблема параллельного использования множества статистических критериев, ориентированных на проверку той или иной статистической гипотезы. Как правило, на малых выборках в 16 опытов статистические критерии дают высокое значение вероятностей ошибок первого и второго рода. *Материалы и методы.* Однако если каждому из статистических критериев построить эквивалентный искусственный нейрон и объединить их в большую сеть искусственных нейронов, то мы получим длинный код с высокой избыточностью. Свертывание избыточности таких кодов позволяет корректировать ошибки некоторых статистических критериев. В работе приведены функциональные зависимости и пороги, используемые при программной реализации 11 новых критериев и эквивалентных им искусственных нейронов. Выделены несколько технических приемов модификации классических статистических критериев, позволяющих до девяти раз снизить значения их вероятностей ошибок первого и второго рода. *Результаты и выводы.* Предположительно, что применение новых статистических критериев может позволить принимать решения с доверительной вероятностью 0,99 при использовании 25 эквивалентных им искусственных нейронов.

Ключевые слова: классические и новые статистические критерии, искусственные нейроны эквивалентные статистическим критериям, параллельный статистический анализ малых выборок, корректировка ошибок выходного кода нейросети

Для цитирования: Иванов А. П., Иванов А. И., Безяев А. В., Куприянов Е. Н., Банных А. Г., Перфилов К. А., Лукин В. С., Савинов К. Н., Полковникова С. А., Серикова Ю. И., Малыгин А. Ю. Обзор новых статистических критериев проверки гипотезы нормальности и равномерности распределения данных малых выборок // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 33–44. doi:10.21685/2307-4205-2022-2-4

REVIEW OF NEW STATISTICAL CRITERIA FOR VERIFICATION OF THE HYPOTHESIS OF NORMALITY AND UNIFORMITY OF DISTRIBUTION OF DATA IN SMALL SAMPLES

**A.P. Ivanov¹, A.I. Ivanov², A.V. Bezyaev³, E.N. Kupriyanov⁴,
A.G. Bannykh⁵, K.A. Perfilov⁶, V.S. Lukin⁷, K.N. Savinov⁸,
S.A. Polkovnikova⁹, Yu.I. Serikova¹⁰, A.Yu. Malygin¹¹**

^{1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11} Penza State University, Penza, Russia

² Penza Research Electrotechnical Institute, Penza, Russia

¹ ap_ivanov@pnzgu.ru, ² ivan@pniei.penza.ru, ^{3, 4, 5, 6, 8} tsib@pnzgu.ru,

⁷ ibst@pnzgu.ru, ^{9, 10} vt@pnzgu.ru, ¹¹ mal890@yandex.ru

Abstract. Background. The problem of parallel use of a set of statistical criteria aimed at testing one or another statistical hypothesis is considered. As a rule, on small samples of 16 experiments, statistical tests give a high value of the probabilities of errors of the first and second kind. *Materials and methods.* However, if we build an equivalent artificial neuron for each of the statistical criteria and combine them into a large network of artificial neurons, then we will get a long code with high redundancy. The reduction of the redundancy of such codes makes it possible to correct the errors of some statistical tests. The paper presents functional dependencies and thresholds used in the software implementation of 11 new criteria and artificial neurons equivalent to them. Several techniques for modifying classical statistical criteria are identified, which allow reducing the values of their probabilities of errors of the first and second kind by up to nine times. *Results and conclusions.* Presumably, the use of new statistical criteria can make it possible to make decisions with a confidence probability of 0,99 when using 25 artificial neurons equivalent to them.

Keywords: classical and new statistical criteria, artificial neurons equivalent to statistical criteria, parallel statistical analysis of small samples, error correction of the neural network output code

For citation: Ivanov A.P., Ivanov A.I., Bezyaev A.V., Kupriyanov E.N., Bannykh A.G., Perfilov K.A., Lukin V.S., Savinov K.N., Polkovnikova S.A., Serikova Yu.I., Malygin A.Yu. Review of new statistical criteria for verification of the hypothesis of normality and uniformity of distribution of data in small samples. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(2):33–44. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-2-4

Введение

В прошлом веке было создано порядка 20 статистических критериев, ориентированных на проверку гипотезы нормального распределения данных, и примерно столько же критериев для проверки гипотезы равномерного распределения данных [1]. К сожалению, каждый из известных статистических критериев имеет свою нелинейную шкалу, соответственно, попытки их совместного использования приводят к необходимости решения сложной технической задачи сопряжения между собой множества непрерывных нелинейных шкал. Проблема усложняется, когда речь идет о статистическом анализе малых выборок. Для каждой выборки объемом 16, 17, 18 и так далее опытов для одного и того же статистического критерия получаются разные шкалы, т.е. приходится решать задачу эволюции нелинейных шкал в зависимости от размеров выборок малого объема.

Выйти из этого тупика удастся, если каждый статистический критерий представить эквивалентным ему искусственным нейроном (перцептроном) с двухуровневым выходным квантователем [2, 3]. В этом случае проблема согласования множества нелинейных шкал сводится к проблеме свертывания кодов с высокой избыточностью с параллельным обнаружением и исправлением ошибок [4–6].

К сожалению, простейшие схемы свертывания кодов с высокой избыточностью плохо работают [2, 3]. Происходит это из-за сильной корреляционной сцепленности всех разрядов избыточных кодов. Так, если ориентироваться на использование 40 классических статистических критериев с показателем корреляционной сцепленности $E(|r|) = 0,399$ при среднем геометрическом вероятностей ошибок $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,287$ каждого из критериев (каждого из эквивалентных им искусственных нейронов) и объеме выборки в 16 опытов, то использование 100 классических критериев позволяет снизить вероятности ошибок примерно в два раза до величины $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,151$ [3]. Столь

значительный уровень ошибок неприемлем для практики. В связи с этим в начале 21 в. возник ренессанс интереса к синтезу новых статистических критериев, ориентированных на совместное использование в нейросетевых обобщениях [7].

Новые статистические критерии, синтезированные в начале 21 в.

Первым убедительным успехом в направлении синтеза новых критериев является применение суммы квадратов среднего геометрического плотности распределения и функции вероятности данных малых выборок [8–10]. Программная реализация этого критерия и вероятности выходных состояний его эквивалентного нейрона приведены на рис. 1.

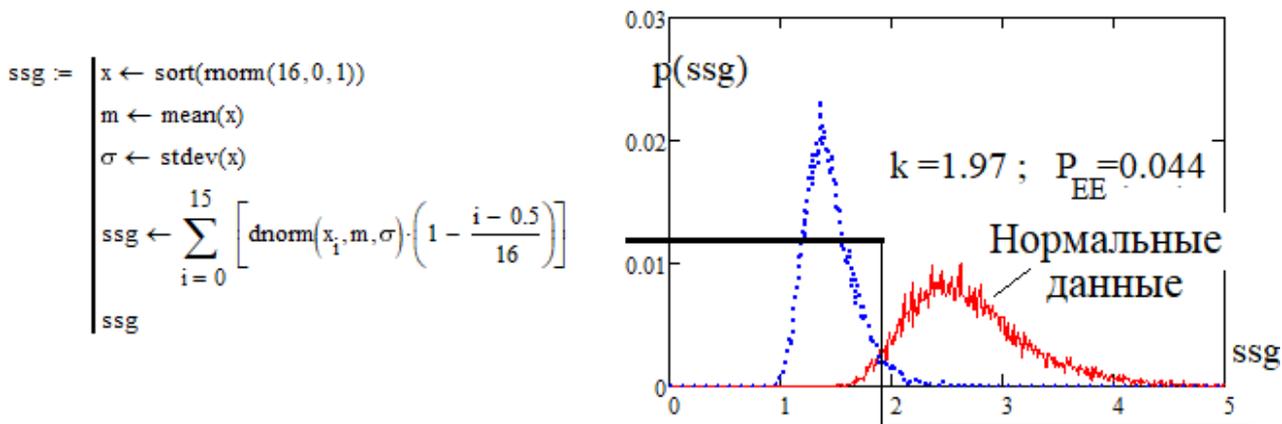


Рис. 1. Новый статистический критерий, показавший в 2014 г. рекордную мощность по отношению к классическим статистическим критериям

Из данных рис. 1 следует, что вероятности ошибок нового нейрона $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,044$ снизились более чем в 5 раз по отношению к аналогичным данным рис. 5 наиболее мощного классического критерия [3]. Обнаружение столь значительного скачка мощности нового критерия вселило оптимизм в исследователей, что способствовало расширению работ по синтезу новых критериев. Однако преимущество роста мощности исчезает, если перейти к прямому вычислению показателя среднего геометрического малой выборки [11, 12], что отображено на рис. 2.

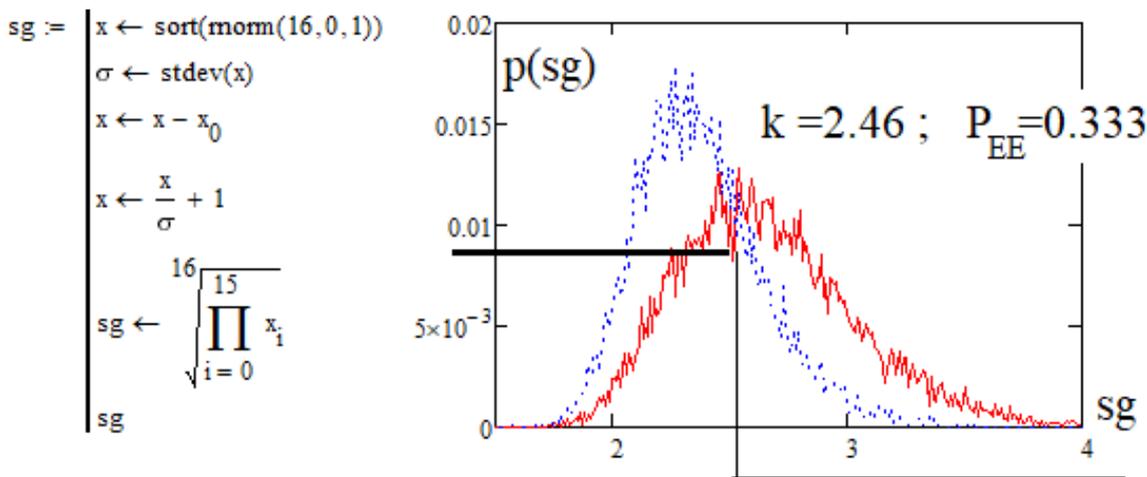


Рис. 2. Критерий среднего геометрического данных малой выборки

Очевидным является то, что наряду с использованием на практике критериев среднего геометрического [13, 14] мы имеем возможность обрабатывать данные в пространстве среднего гармонического [15–17]. Программа для воспроизведения нейрона среднего гармонического и плотности вероятности его выходных состояний для нормальных и равномерно распределенных данных приведены на рис. 3.

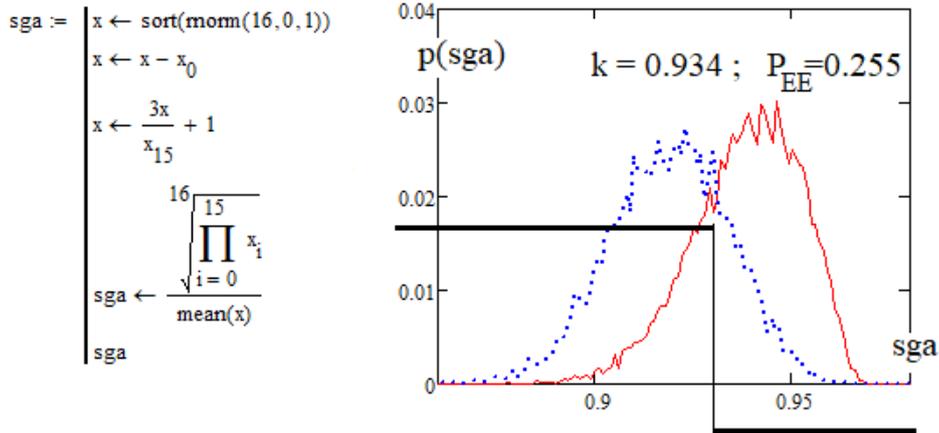


Рис. 3. Нейрон с накоплением данных в пространстве среднего гармонического

Отметим, что в теории статистической обработки данных [2] хорошо изучен критерий Крамера – фон Мизеса, синтезированный в 1928 г. Он построен на сравнении экспериментальной и теоретической функции вероятности. Очевидно, что мы можем построить дифференциальный аналог критерия Крамера – фон Мизеса [18, 19], сравнивая между собой экспериментальную и теоретическую плотности распределения значений. Программное обеспечение и результаты соответствующего численного эксперимента приведены на рис. 4.

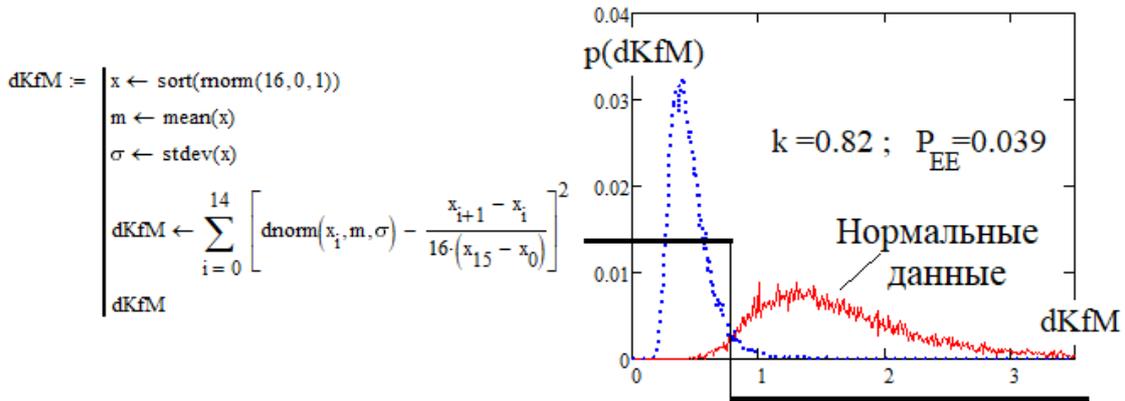


Рис. 4. Нейрон дифференциального аналога критерия Крамера – фон Мизеса 2016 г.

Мы наблюдаем скачек мощности нового дифференциального критерия примерно в 9 раз по сравнению с его классическим аналогом [3].

Аналогичная ситуация возникает и при переходе к использованию дифференциального аналога классического критерия Смирнова – Крамера – фон Мизеса, критерия Андерсона – Дарлинга, критерия Фроцини (рис. 5–7).

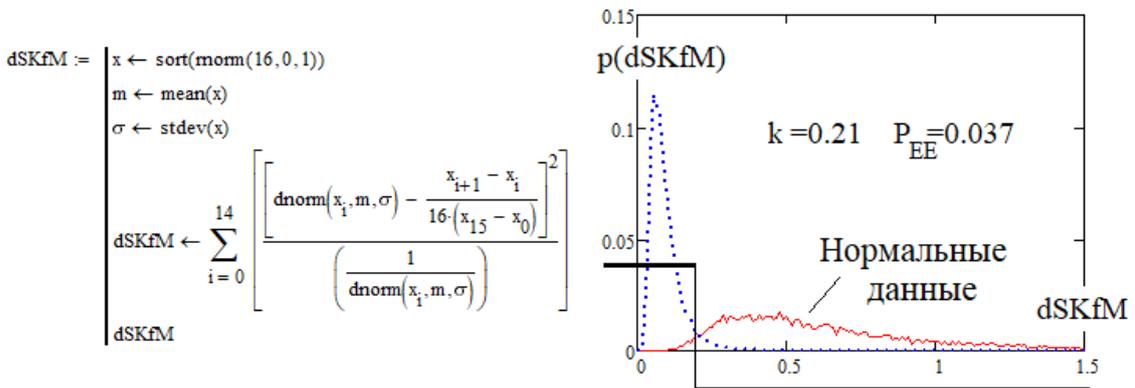


Рис. 5. Нейрон дифференциального аналога классического критерия Смирнова – Крамера – фон Мизеса 2016 г. [18, 19]

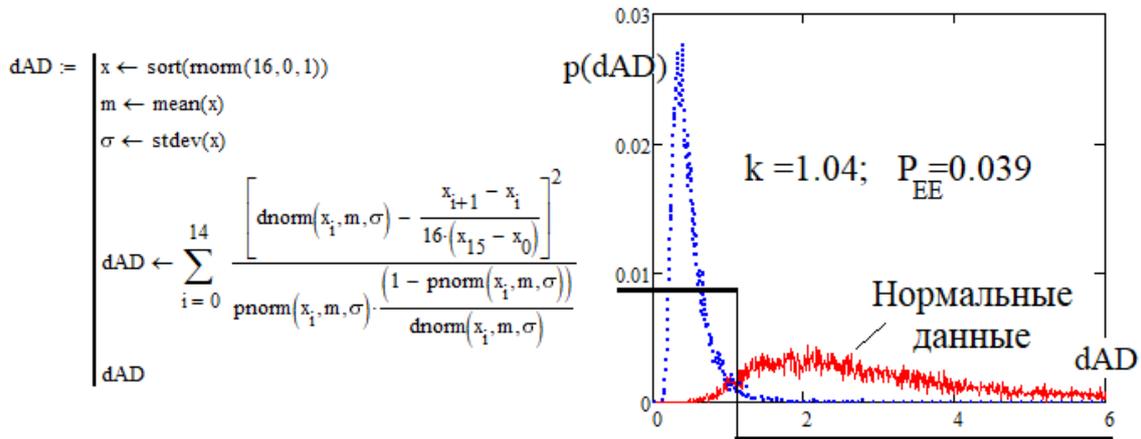


Рис. 6. Нейрон дифференциального аналога критерия Андерсона – Дарлинга 2016 г. [18, 19]

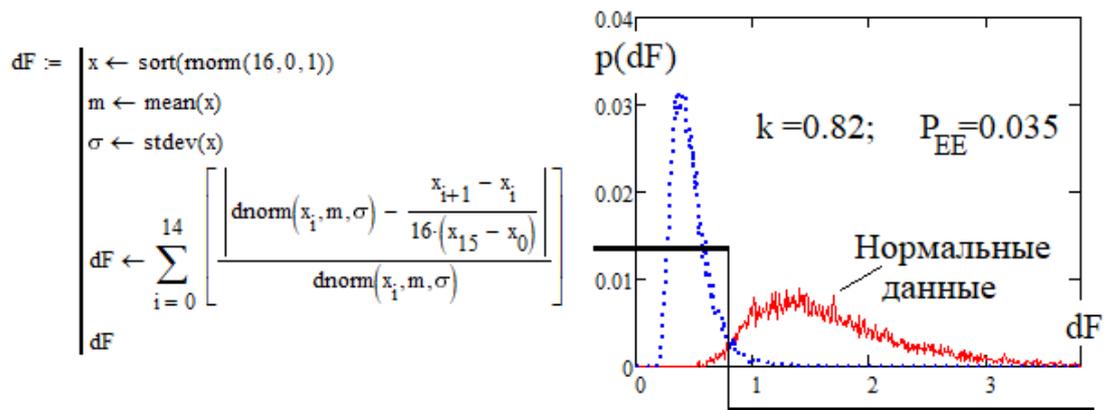


Рис. 7. Нейрон дифференциального аналога критерия Фроцини 2016 г. [18, 19]

Искусственные нейроны среднего геометрического и среднего гармонического похожи между собой по их функциональным связям и по их программной реализации [13, 14]. Как результат, мы имеем для них сопоставимые вероятностные характеристики. Так, исследуемые первыми нейроны суммы квадрата среднего геометрического (см. рис. 1) при отображении их в пространство среднего гармонического дают близкие вероятности ошибок. Программное обеспечение и результаты соответствующего численного эксперимента отображены на рис. 8.

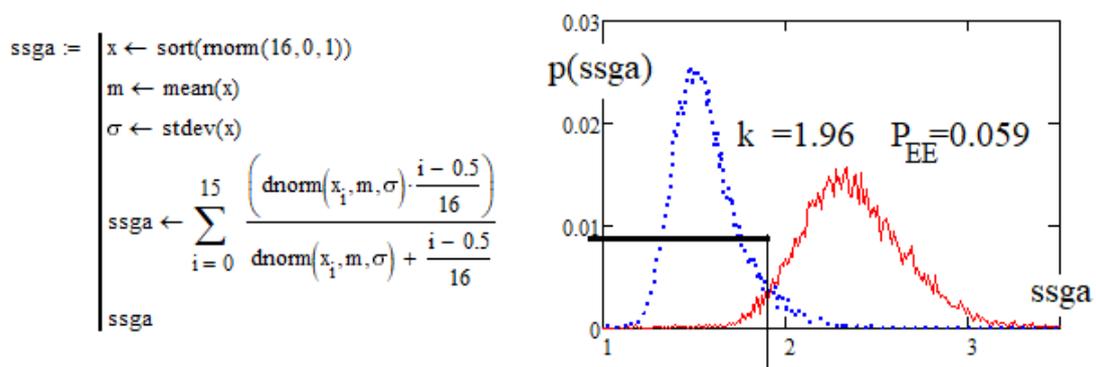


Рис. 8. Нейрон накопления среднего гармонического 2018 г.

Продолжение исследований по возможностям использования дифференциальной плотности распределений позволило в 2020 г. получить новый статистический критерий «суммы хвостов» [20]. Этот критерий построен на том, что вероятность наблюдения значительных «хвостов» нормально распределенных данных существенно меньше в сравнении с равномерно распределенными данными (рис. 9).

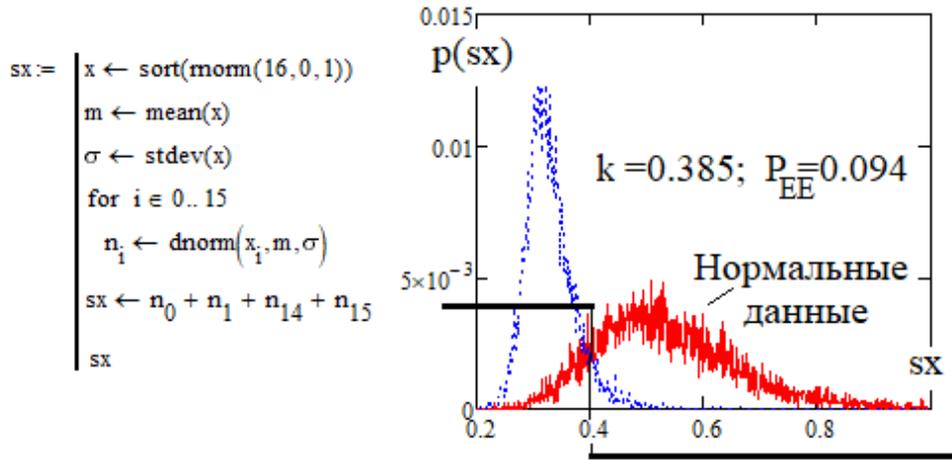


Рис. 9. Нейрон эквивалентный критерию «суммы хвостов» 2020 г. [20]

Примерно такой же результат получается и при применении функции вероятности нормально распределенных данных, если выполнить операцию дифференцирования (вычитания) данных экспериментального распределения и приближенной вероятности их появления [20]. Подтверждающие это данные приведены на рис. 10.

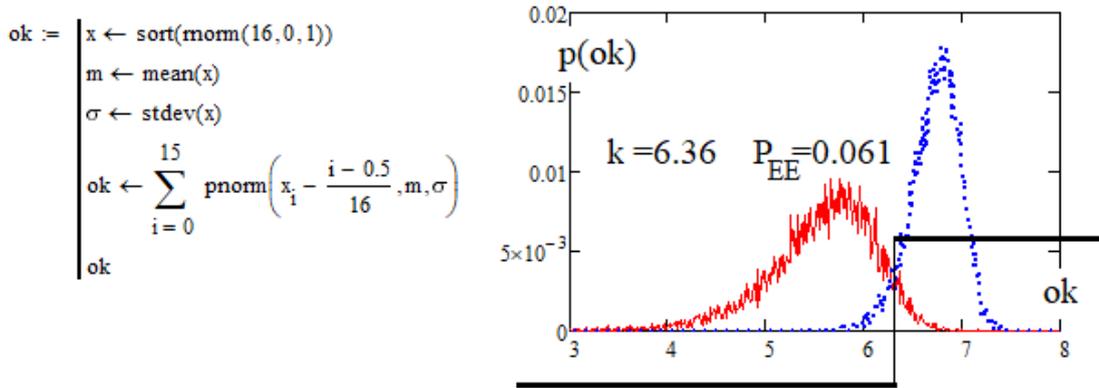


Рис. 10. Нейрон функции вероятности с псевдодифференцированием входных данных 2020 г. [20]

Еще один вариант синтеза нового статистического критерия выполняется через простое дифференцирование случайных входных данных малой выборки с его умножением на теоретическую плотность вероятности. При вычислении дифференциала данных малой выборки выполнена регуляризация расчетов, исключающая случайное деление разности на ноль. Результаты численного эксперимента приведены на рис. 11 [21].

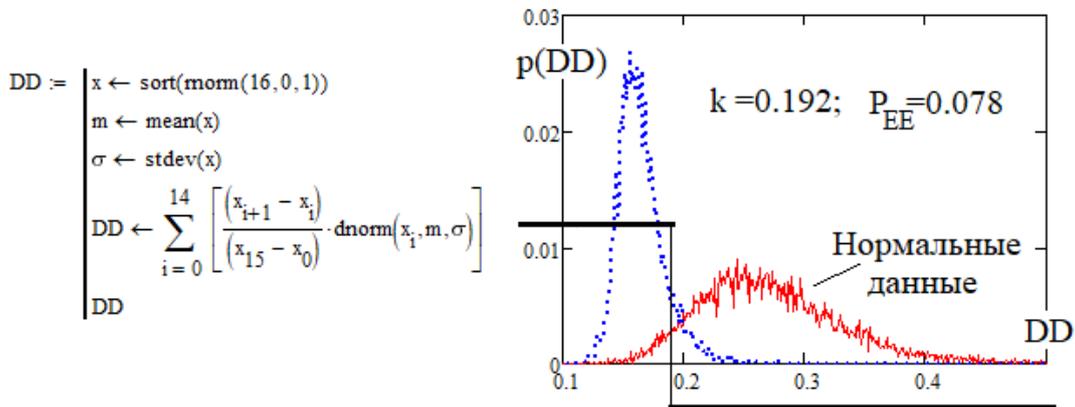


Рис. 11. Нейрон эквивалентный критерию двойного дифференцирования входных данных малой выборки 2021 г. [21]

**Групповое сравнение 11 новых статистических критериев
с потенциалом классических статистических критериев**

В предыдущей статье [3] было вычислено среднее геометрическое вероятностей ошибок первого и второго рода для 9 классических статистических критериев, составляющее значение $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,287$. Вычисление значений для 11 рассматриваемых выше новых критериев дает величину $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,07$. Это свидетельствует о росте относительной мощности новых статистических критериев примерно в четыре раза. Однако простого роста мощности по среднему геометрическому в группе сопрягаемых статистических критериев недостаточно. Дополнительно нужно учитывать корреляционные связи в группе. В табл. 2 приведены коэффициенты парной корреляции между рассмотренными критериями.

Таблица 2

Мощность новых статистических критериев и коэффициенты парной корреляции между ними

P_{EE}		2014	2014	2016	2016	2016	2016	2017	2018	2020	2020	2021
		ssg	sg	dKfM	dSKfM	dAD	dF	sga	ssga	ok	sx	DD
0.044	ssg	1	0.053	0.978	0.916	0.917	0.978	0.13	0.319	-0.969	0.769	0.833
0.333	sg		1	0.092	0.073	0.05	0.089	0.813	0.054	0.173	-0.054	-0.411
0.039	dKfM			1	0.975	0.973	1	0.147	0.316	-0.942	0.733	0.806
0.037	dSKfM				1	0.997	0.975	0.114	0.298	-0.903	0.684	0.766
0.039	dAD					1	0.973	0.081	0.298	-0.91	0.716	0.79
0.035	dF						1	0.145	0.316	-0.942	0.734	0.807
0.255	sga							1	0.044	0.039	-0.134	-0.352
0.059	ssga								1	-0.303	0.27	0.262
0.061	ok									1	-0.789	-0.918
0.094	sx										1	0.754
0.078	DD											1

Среднее значение модулей коэффициентов парной корреляции новых статистических критериев составляет значение $E(|r|) = 0,578$, что несколько хуже в сравнении с этим же показателем у классических статистических критериев $E(|r|) = 0,4$. Для сравнения групповых возможностей классических и новых статистических критериев выполним их симметризацию [22] и численное моделирование симметричных сетей искусственных нейронов. Результаты численного моделирования отображены в логарифмических координатах на рис. 12.

В верхней части рис. 12 отображены данные классических нейронов с относительно низким качеством принятия решений, ранее приведенные в работе [3]. В нижней части рисунка отображены три линии экстраполяции прогнозов, построенные на численном моделировании на языке MathCAD для простейших корректоров ошибок для 9 новых более мощных статистических критериев. Из данных рис. 12 видно, что простое увеличение мощности через снижение среднего геометрического вероятностей ошибок с величины 0,287 до величины 0,07 при сохранении среднего значения модулей корреляции дает верхнюю прямую нижней части рисунка. Две верхние прямые рис. 12 параллельны. Нижняя из двух верхних параллельных прямых является оценкой сверху вероятностей ошибок. Пессимистическая оценка сверху построена на предположении о совпадении коэффициентов корреляции у новых статистических критериев и классических статистических критериев.

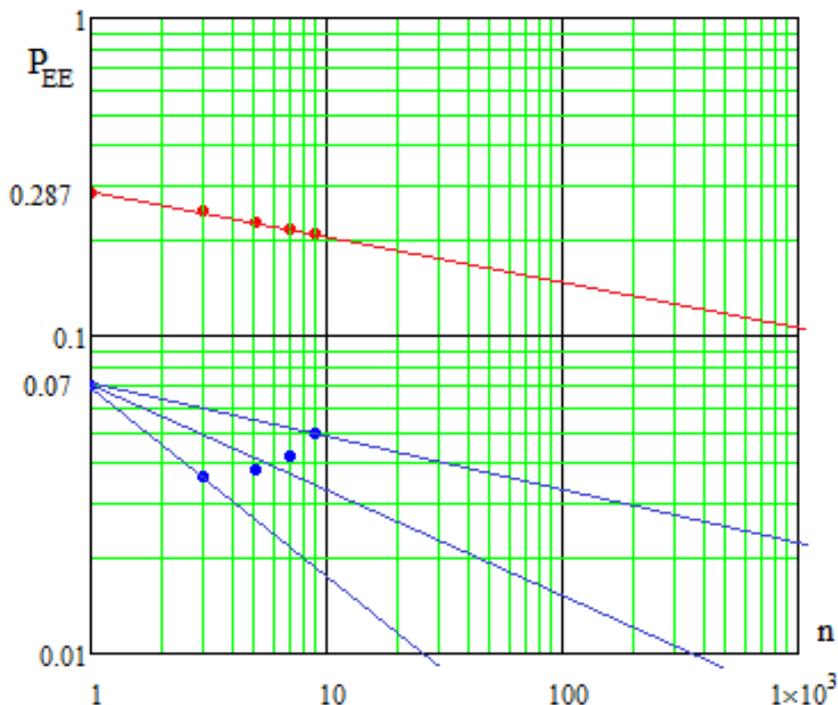


Рис. 12. Результаты численного моделирования связи вероятности ошибок первого и второго рода и числа необходимых искусственных нейронов

Оптимистической является оценка по нижней прямой, которая построена на точке среднего геометрического 0,07 и точке корректора избыточного кода трех искусственных нейронов. Эта оптимистическая оценка позволяет надеяться на то, что приемлемые для практики вероятности ошибок первого и второго рода $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,01$ могут быть достигнуты при использовании примерно 25 новых статистических критериев.

Точкам, соответствующим сетям с 5, 7, 9 искусственными нейронами, доверять нельзя, так как они показывают снижение качества принимаемых нейросетями решений. Скорее всего это эффект накопления ошибок из-за ограниченного числа данных при проведении численного эксперимента (выборка из 9999 опытов) и малого числа учитываемых разрядов (эффекта блуждания статистических оценок математических ожиданий и стандартных отклонений). Тем не менее мы всегда можем построить усредненную оценку между оптимистической и пессимистической оценками. Такая усредненная оценка соответствует центральной прямой (центральному лучу, исходящему из точки $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,07$).

Список литературы

1. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М. : Физматлит, 2006. 816 с.
2. Иванов А. П., Иванов А. И., Безяев А. В. [и др.]. Альбом статистических критериев, ориентированных на совместное использование при проверке гипотезы нормального или равномерного распределения данных малых выборок : препринт. Пенза, 2022. 22 с. doi:10.13140/RG.2.2.15891.76324.
3. Иванов А. П., Иванов А. И., Малыгин А. Ю. [и др.]. Альбом из девяти классических статистических критериев для проверки гипотезы нормального или равномерного распределения данных малых выборок // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 20–29.
4. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. М. : Техносфера, 2007. 320 с.
5. Безяев А. В. Биометрико-нейросетевая аутентификация: обнаружение и исправление ошибок в длинных кодах без накладных расходов на избыточность : препринт. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. 40 с.
6. Иванов А. И., Банных А. Г., Безяев А. В. Искусственные молекулы, собранные из искусственных нейронов, воспроизводящих работу классических статистических критериев // Вестник Пермского университета. Сер.: Математика. Механика. Информатика. 2020. № 1. С. 26–32.
7. Иванов А. И., Банных А. Г., Куприянов Е. Н. [и др.]. Коллекция искусственных нейронов эквивалентных статистическим критериям для их совместного применения при проверке гипотезы нормальности малых

выборки биометрических данных // Безопасность информационных технологий : сб. науч. ст. по материалам I Всерос. науч.-техн. конф. Пенза, 2019. С. 156–164.

8. Перфилов К. А. Критерий среднего геометрического, используемый для проверки достоверности статистических гипотез распределения биометрических данных // Труды научно-технической конференции кластера пензенских предприятий, обеспечивающих безопасность информационных технологий. Пенза, 2014. Т. 9. С. 92–93. URL: <http://www.pniei.penza.ru/RV-conf/T9/C92>
9. Перфилов К. А., Иванов А. И., Проценко Е. Д. Расширение многообразия статистических критериев, используемых при проверке гипотез распределения значений биометрических данных // Европейский союз ученых. 2015. № 13, ч. 5. С. 9–12.
10. Иванов А. И., Перфилов К. А., Малыгина Е. А. Многомерный статистический анализ качества биометрических данных на предельно малых выборках с использованием критериев среднего геометрического, вычисленного для анализируемых функций вероятности // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2016. № 2. С. 58–66.
11. Иванов А. И., Перфилов К. А., Малыгина Е. А. Оценка качества малых выборок биометрических данных с использованием дифференциального варианта статистического критерия среднего геометрического // Вестник СИБГАУ. 2016. № 4. С. 864–871.
12. Волчихин В. И., Иванов А. И., Перфилов К. А. [и др.]. Быстрый алгоритм обучения сетей искусственных нейронов квадрата среднего геометрического плотностей распределения значений многомерных биометрических данных // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2018. № 3. С. 23–35.
13. Иванов А. И., Перфилов К. А., Лукин В. С. Нейросетевое обобщение семейства статистических критериев среднего геометрического и среднего гармонического для прецизионного анализа малых выборок биометрических данных // Информационно-управляющие телекоммуникационные системы, средства поражения и их техническое обеспечение : сб. науч. ст. Всерос. науч.-техн. конф. / под общ. ред. В. С. Безяева. Пенза : АО «НПП "Рубин"», 2019. С. 50–63.
14. Лукин В. С. Сравнение мощности обычной и логарифмической форм статистических критериев среднего гармонического при использовании для проверки гипотезы нормального распределения данных малой выборки // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2020. № 4. С. 19–26.
15. Лукин В. С., Иванов А. И. Доверенный искусственный интеллект, построенный с использованием нейронов среднего гармонического // Искусственный интеллект в решении актуальных социальных и экономических проблем XXI века : сб. ст. по материалам Седьмой Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Пермь, 21–22 октября 2021 г.). Пермь, 2021. С. 441–445.
16. Лукин В. С. Иванов А. И. Оптимизация процедуры нормирования и смещения входных данных для нейронов среднего гармонического, используемых при проверке гипотезы нормального распределения малых выборок // Динамика систем, механизмов и машин. 2021. Т. 9, № 4. doi:10.25206/2310-9793-9-4-11-14
17. Иванов А. И. Многомерная нейросетевая обработка биометрических данных с программным воспроизведением эффектов квантовой суперпозиции. Пенза : Изд-во АО «ПНИЭИ», 2016. 133 с. URL: <http://пниэи.рф/activity/science/BOOK16.pdf>
18. Волчихин В. И., Иванов А. И., Перфилов К. А. [и др.]. Быстрый алгоритм обучения сетей искусственных нейронов квадрата среднего геометрического плотностей распределения значений многомерных биометрических данных // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2018. № 3. С. 23–35.
19. Иванов А. И. Искусственные математические молекулы: повышение точности статистических оценок на малых выборках (программы на языке MathCAD) : препринт. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. 36 с.
20. Иванов А. И., Малыгин А. Ю., Полковникова С. А. Новый статистический критерий большой мощности, полученный дифференцированием случайных данных малой выборки // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 3. С. 67–74. doi:10.21685/2072-3059-2021-3-7
21. Иванов А. И., Банных А. Г., Серикова Ю. И. Учет влияния корреляционных связей через их усреднение по модулю при нейросетевом обобщении статистических критериев для малых выборок // Надежность. 2020. № 20. С. 28–34. doi:10.21683/1729-2646-2020-20-2-28-34

References

1. Kobzar' A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov = Applied mathematical statistics. For engineers and researchers.* Moscow: Fizmatlit, 2006:816. (In Russ.)
2. Ivanov A.P., Ivanov A.I., Bezyaev A.V. [et al.]. *Al'bom statisticheskikh kriteriev, orientirovannykh na sovmestnoe ispol'zovanie pri proverke gipotezy normal'nogo ili ravnomernogo raspredeleniya dannykh malykh vyborok: preprint = Album of statistical criteria focused on sharing when testing the hypothesis of normal or uniform distribution of small sample data : preprint.* Penza, 2022:22. (In Russ.). doi:10.13140/RG.2.2.15891.76324.
3. Ivanov A.P., Ivanov A.I., Malygin A.Yu. [et al.]. An album of nine classical statistical criteria for testing the hypothesis of normal or uniform distribution of small sample data. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(1):20–29. (In Russ.)

4. Morelos-Saragosa R. *Iskusstvo pomekhoustoychivogo kodirovaniya = The art of noise-resistant coding*. Moscow: Tekhnosfera, 2007:320. (In Russ.)
5. Bezyaev A.V. *Biometriko-neyrosetevaya autentifikatsiya: obnaruzhenie i ispravlenie oshibok v dlinnykh kodakh bez nakladnykh raskhodov na izbytochnost': preprint = Biometric-neural network authentication: detection and correction of errors in long codes without redundancy overhead : preprint*. Penza: Izd-vo PGU, 2020:40. (In Russ.)
6. Ivanov A.I., Bannykh A.G., Bezyaev A.V. Artificial molecules assembled from artificial neurons reproducing the work of classical statistical criteria. *Vestnik Permskogo universiteta. Ser.: Matematika. Mekhanika. Informatika = Bulletin of the Perm University. Ser.: Matematika. Mechanics. Computer science*. 2020;(1):26–32. (In Russ.)
7. Ivanov A.I., Bannykh A.G., Kupriyanov E.N. [et al.]. Collection of artificial neurons equivalent to statistical criteria for their joint application when testing the hypothesis of normality of small samples of biometric data. *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy: sb. nauch. st. po materialam I Vseros. nauch.-tekhn. konf. = Information technology security : collection of scientific articles based on the materials of I All-Russian Scientific-technical. conf*. Penza, 2019:156–164. (In Russ.)
8. Perfilov K.A. The criterion of the geometric mean used to verify the reliability of statistical hypotheses of the distribution of biometric data. *Trudy nauchno-tehnicheskoy konferentsii klastera penzenskikh predpriyatiy, obespechivayushchikh bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy = Proceedings of the scientific and technical conference of the cluster of Penza enterprises ensuring the security of information technologies*. Penza, 2014;9:92–93. (In Russ.). Available at: <http://www.pniei.penza.ru/RV-conf/T9/S92>
9. Perfilov K.A., Ivanov A.I., Protsenko E.D. Expansion of the variety of statistical criteria used in testing hypotheses of the distribution of biometric data values. *Evropeyskiy soyuz uchenykh = European Union of Scientists*. 2015;(13):9–12. (In Russ.)
10. Ivanov A.I., Perfilov K.A., Malygina E.A. Multidimensional statistical analysis of the quality of biometric data on extremely small samples using geometric mean criteria calculated for the analyzed probability functions. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2016;(2):58–66. (In Russ.)
11. Ivanov A.I., Perfilov K.A., Malygina E.A. Evaluation of the quality of small samples of biometric data using a differential variant of the statistical criterion of the geometric mean. *Vestnik SIBGAU = Bulletin of SIBGAU*. 2016;(4):864–871. (In Russ.)
12. Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Perfilov K.A. [et al.]. Fast algorithm training networks of artificial neurons of the square of the geometric mean densities of the distribution of values of multidimensional biometric data. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki = Proceedings of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences*. 2018;(3):23–35. (In Russ.)
13. Ivanov A.I., Perfilov K.A., Lukin V.S. Neural network generalization of a family of statistical criteria of geometric mean and harmonic mean for precision analysis of small samples of biometric data. *Informatsionno-upravlyayushchie telekommunikatsionnye sistemy, sredstva porazheniya i ikh tekhnicheskoe obespechenie: sb. nauch. st. Vseros. nauch.-tekhn. konf. = Information and control telecommunication systems, means of communication and their technical support : collection of scientific articles of All-Russian Scientific and technical. conf*. Penza: AO «NPP "Rubin"», 2019:50–63. (In Russ.)
14. Lukin V.S. Comparison of the power of the usual and logarithmic forms of statistical criteria of the harmonic mean when used to test the hypothesis of the normal distribution of small sample data. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki = Proceedings of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences*. 2020;(4):19–26. (In Russ.)
15. Lukin V.S., Ivanov A.I. Trusted artificial intelligence built with the use of medium harmonic neurons. *Iskusstvennyy intellekt v reshenii aktual'nykh sotsial'nykh i ekonomicheskikh problem KhKhI veka: sb. st. po materialam Sed'moy Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem (g. Perm', 21–22 oktyabrya 2021 g.) = Artificial intelligence in solving actual social and economic problems of the XXI century : collection of articles based on the materials of the Seventh All-Russian Scientific and Practical Conference with international participation (Perm, October 21–22, 2021)*. Perm, 2021:441–445. (In Russ.)
16. Lukin V.S. Ivanov A.I. Optimization of the procedure of normalization and bias of input data for harmonic mean neurons used in testing the hypothesis of the normal distribution of small samples. *Dinamika sistem, mekhanizmov i mashin = Dynamics of systems, mechanisms and machines*. 2021;9(4). (In Russ.). doi:10.25206/2310-9793-9-4-11-14
17. Ivanov A.I. *Mnogomernaya neyrosetevaya obrabotka biometricheskikh dannykh s programmnyim vosproizvedeniem effektivov kvantovoy superpozitsii = Multidimensional neural network processing of biometric data with software reproduction of quantum superposition effects*. Penza: Izd-vo AO «PNIEI», 2016:133. (In Russ.). Available at: <http://pniei.pf/activity/science/BOOK16.pdf>
18. Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Perfilov K.A. [et al.]. Fast algorithm for training networks of artificial neurons of the square of the geometric mean densities of the distribution of values of multidimensional biometric data. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskije nauki = Proceedings of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences*. 2018;(3):23–35. (In Russ.)

19. Ivanov A.I. *Iskusstvennyye matematicheskie molekuly: povyschenie tochnosti statisticheskikh otsenok na malykh vyborkakh (programmy na yazyke MathCAD): preprint = Artificial mathematical molecules: improving the accuracy of statistical estimates on small samples (programs in MathCAD) : preprint*. Penza: Izd-vo PGU, 2020:36. (In Russ.)
20. Ivanov A.I., Malygin A.Yu., Polkovnikova S.A. A new statistical criterion of high power obtained by differentiating random data of a small sample. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences*. 2021;(3):67–74. (In Russ.). doi:10.21685/2072-3059-2021-3-7
21. Ivanov A.I., Bannykh A.G., Serikova Yu.I. Accounting for the influence of correlations through their modulus averaging in neural network generalization of statistical criteria for small samples. *Nadezhnost' = Reliability*. 2020;(20):28–34. (In Russ.). doi:10.21683/1729-2646-2020-20-2-28-34

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Петрович Иванов

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой технических средств
информационной безопасности,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ap_ivanov@pnzgu.ru

Александр Иванович Иванов

доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
Пензенский научно-исследовательский
электротехнический институт
(Россия, г. Пенза, ул. Советская, 9)
E-mail: ivan@pniei.penza.ru

Александр Викторович Безяев

кандидат технических наук, докторант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tsib@pnzgu.ru

Евгений Николаевич Куприянов

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: evgnkupr@gmail.com

Андрей Григорьевич Банных

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tsib@pnzgu.ru

Константин Александрович Перфилов

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tsib@pnzgu.ru

Aleksey P. Ivanov

Candidate of technical sciences, associate professor
head of the sub-department of technical means
of information security,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Aleksandr I. Ivanov

Doctor of technical sciences, associate professor,
senior researcher,
Penza Research Electrotechnical Institute
(9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

Aleksandr V. Bezyaev

Candidate of technical sciences,
doctor's degree student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Evgeniy N. Kupriyanov

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Andrey G. Bannykh

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Konstantin A. Perfilov

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Виталий Сергеевич Лукин

младший научный сотрудник,
Региональный учебно-научный центр
«Информационная безопасность»,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: ibst@pnzgu.ru

Константин Николаевич Савинов

старший преподаватель,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tsib@pnzgu.ru

Светлана Андреевна Полковникова

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: vt@pnzgu.ru

Юлия Игоревна Серикова

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: vt@pnzgu.ru

Александр Юрьевич Малыгин

доктор технических наук, профессор,
начальник межотраслевой лаборатории тестирования
биометрических устройств и технологий,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: mal890@yandex.ru

Vitaliy S. Lukin

Junior researcher,
Regional Training and Research Center
"Information Security",
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Konstantin N. Savinov

Senior lecturer,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Svetlana A. Polkovnikova

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Yuliya I. Serikova

Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Aleksandr Yu. Malygin

Doctor of technical sciences, professor,
head of the Intersectoral testing laboratory
of biometric devices and technologies,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 15.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 10.01.2022

Принята к публикации/Accepted 15.02.2022

ОСОБЕННОСТИ ДИАГНОСТИКИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МУЛЬТИКЛАССОВОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

В. Н. Клячкин¹, И. Н. Карпунина²

¹ Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

² Ульяновский институт гражданской авиации, Ульяновск, Россия

¹ v_kl@mail.ru, ² karpunina531@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цель.* Постоянно растущие требования по обеспечению безопасности и надежности технических систем приводят к необходимости более точной диагностики состояния объекта в условиях эксплуатации по результатам мониторинга показателей функционирования этого объекта. Иногда необходимо состояние объекта описать с помощью нескольких возможных вариантов. В этом случае проводится мультиклассовая классификация, при которой возможные состояния объекта подразделяются на несколько классов, например, по виду отказа. При этом могут эффективно использоваться методы машинного обучения. Особенности рассматриваемой задачи – ограниченный объем выборочных данных, а также несбалансированность обучающей выборки: информации о показателях функционирования при неработоспособных состояниях объекта, как правило, гораздо меньше, чем при работоспособных. Цель исследования – разработка технологии диагностики состояния технического объекта по заданным показателям его функционирования с учетом этих особенностей. *Материалы и методы.* Среди используемых методов машинного обучения для мультиклассовой классификации следует отметить как стандартные статистические, так и специальные: нейронные сети, композиционные модели, агрегированные классификаторы. В данной работе для мультиклассовой классификации применен метод Random Forest («случайный лес»), показавший высокое качество при решении различных задач машинного обучения. *Результаты и выводы.* Разработана технология мультиклассовой диагностики технических систем с применением «случайного леса» в системе Statistica. На примере диагностики компьютерной системы показано, что использование этого метода обеспечивает достаточно высокую точность классификации. В случае несбалансированности классов в качестве критерия классификации вместо доли ошибок используется F -мера. При необходимости количество показателей функционирования может быть сокращено с учетом их значимости.

Ключевые слова: техническая диагностика, показатели функционирования, машинное обучение, случайный лес, система Statistica

Для цитирования: Клячкин В. Н., Карпунина И. Н. Особенности диагностики технических систем с использованием мультиклассовой классификации // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 45–52. doi:10.21685/2307-4205-2022-2-5

FEATURES OF DIAGNOSTICS OF TECHNICAL SYSTEMS USING MULTICLASS CLASSIFICATION

V.N. Klyachkin¹, I.N. Karpunina²

¹ Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

² Ulyanovsk Institute of Civil Aviation, Ulyanovsk, Russia

¹ v_kl@mail.ru, ² karpunina531@yandex.ru

Abstract. *Background.* Constantly growing requirements for ensuring the safety and reliability of technical systems lead to the need for more accurate diagnostics of the state of the facility in operating conditions based on the results of monitoring the performance of this facility. Sometimes it is necessary to describe the state of an object using several possible options. In this case, a multiclass classification is carried out, in which the possible states of the object are divided into several classes, for example, by the type of failure. At the same time, machine learning methods can be effectively used. Features of the problem under consideration are a limited amount of sample data, as well as the imbalance of the training sample: information on the performance indicators of functioning in inoperable states of the object, as a rule, is much less than in the case of able-bodied ones. The purpose of the study is to develop a technology for diagnosing the state of a technical object according to the specified indicators of its functioning, taking into account these features. *Materials and methods.* Among the machine learning methods used for multiclass classification

are both standard statistical and special: neural networks, compositional models, aggregated classifiers. In this paper, the Random Forest method was used for multiclass classification, which showed high quality in solving various machine learning problems. *Results and conclusions.* A technology for multiclass diagnostics of technical systems using a random forest in the Statistica system has been developed. On the example of diagnostics of a computer system, it is shown that the use of this method provides a sufficiently high accuracy of classification. In case of class imbalance, F is used as a classification criterion instead of the error rate. – Measure. If necessary, the number of performance indicators can be reduced taking into account their importance.

Keywords: technical diagnostics, performance indicators, machine learning, random forest, Statistica system

For citation: Klyachkin V.N., Karpunina I.N. Features of diagnostics of technical systems using multiclass classification. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(2):45–52. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-2-5

Постановка задачи

Постоянно растущие требования по обеспечению безопасности и надежности технических систем приводят к необходимости более точной диагностики состояния объекта в условиях эксплуатации по результатам мониторинга показателей функционирования этого объекта [1–4]. Современные компьютерные технологии, в частности, методы машинного обучения, дают возможность решить эту задачу [2, 5].

Диагностика может сводиться к распознаванию одного из двух состояний: к разделению состояний объекта на исправные или неисправные. В этом случае применяются методы бинарной классификации. Однако иногда необходимо более детальное исследование, когда состояние объекта необходимо описать с помощью нескольких возможных вариантов (а не только двух: исправен объект или неисправен). Например, такая задача решалась с применением нейронных сетей при классификации режимов работы авиационного газотурбинного двигателя [6, 7]. В этом случае проводится мультиклассовая классификация, при которой возможные состояния объекта подразделяются на несколько классов, например, по виду отказа. Как и при бинарной классификации здесь могут эффективно использоваться методы машинного обучения.

Выборка, полученная по результатам предварительных испытаний технического объекта (это могут быть как специально поставленный эксперимент, так и исследование в процессе эксплуатации), разбивается на две части: обучающую и тестовую. Обучающая часть предназначена для построения моделей, с помощью которых состояние объекта разделяется на заданное количество классов: требуется построить алгоритм, который для заданного набора показателей функционирования обеспечил бы достаточно точный результат о состоянии объекта. Тестовая часть выборки предназначена для оценки качества классификации.

Среди используемых методов следует отметить как стандартные статистические, так и специальные: нейронные сети, композиционные модели, агрегированные классификаторы [8–11]. Наиболее эффективно, как показывают исследования, глубокое обучение нейронных сетей, однако два обстоятельства часто препятствуют их практическому применению.

Первое – это необходимость достаточно большого объема выборочных данных, что для технических систем, как правило, нереально. Второе состоит в том, что для глубокого обучения необходима мощная вычислительная техника, которая далеко не всегда имеется в распоряжении исследователя в производственных условиях.

При бинарной классификации хорошие результаты показывают агрегированные методы, однако это не подтвердилось в условиях разделения состояния объекта на множество классов.

В рассматриваемой ситуации наиболее эффективно применение композиционных методов. В данной работе для мультиклассовой классификации применен метод Random Forest («случайный лес»), показавший высокое качество при решении различных задач машинного обучения [9].

Еще одна существенная особенность рассматриваемой задачи состоит в несбалансированности обучающей выборки: информации о показателях функционирования при неработоспособных состояниях объекта, как правило, гораздо меньше, чем при работоспособных. При сбалансированных данных критерием качества модели обычно служит функционал ошибок – среднее количество несопадений фактического и прогнозируемого состояний, или доля ошибок на тестовой выборке.

Для учета несбалансированности классов критерием качества классификации следует выбирать F -меру: гармоническое среднее между точностью и полнотой классификации; чем это значение ближе к единице, тем качество классификации лучше. Иногда, например, при совпадении значений этой меры для различных методов можно дополнительно использовать в качестве критерия площадь под кривой ошибок AUC [12–14].

При большом количестве показателей, характеризующих качество функционирования технической системы (иногда их может быть несколько десятков), целесообразно отобрать некоторое их подмножество. Для решения этой задачи могут быть построены регрессионные модели зависимости отклика (класса) от показателей функционирования, при этом значимые показатели отбираются по критерию Стьюдента. С другой стороны, значимость показателей может быть оценена и непосредственно средствами случайного леса.

Выборка представляется в виде матрицы X показателей функционирования системы, элементы которой x_{ij} – результат i -го наблюдения по j -му показателю; $i = 1, \dots, l, j = 1, \dots, p$ (l – количество строк, или число наблюдений, p – количество столбцов, или число показателей), и вектора-столбца ответов Y , состоящего из номеров классов. Каждой строке x_i матрицы X соответствует определенное значение y_i вектора Y . Совокупность пар (x_i, y_i) образует выборку исходных данных – прецедентов.

Задача состоит в построении модели, которая по заданной строке показателей функционирования x_i предскажет номер класса y_i , определяющего состояние рассматриваемого объекта.

Цель исследования – разработка технологии диагностики состояния технического объекта по заданным показателям его функционирования.

Метод Random Forest для мультиклассовой классификации

Random Forest, или случайный лес, – это алгоритм машинного обучения, предложенный Л. Брейманом [9], он использует ансамбль (комитет) решающих деревьев. Алгоритм сочетает в себе бэггинг (случайный выбор с возвращением) и метод случайных подпространств. Он состоит из множества независимых деревьев решений, при этом используется случайная выборка наблюдений из обучающего набора и случайный набор показателей при принятии решений о разбиении узлов. Случайный лес применяется для решения задач классификации, регрессии и кластеризации.

Классификация объектов проводится путем голосования: каждое дерево комитета относит классифицируемый объект к одному из классов, а побеждает класс, за который проголосовало наибольшее число деревьев. Оптимальное число деревьев подбирается таким образом, чтобы минимизировать ошибку классификатора на тестовой выборке.

Метод имеет высокую точность предсказания, нечувствителен к монотонным преобразованиям значений показателей, редко переобучается: добавление деревьев почти всегда только улучшает композицию, но после достижения определенного количества деревьев кривая обучения выходит на асимптоту. К недостаткам относят то, что в отличие от одного дерева, результаты случайного леса сложнее интерпретировать; кроме того, требуется много памяти для хранения модели вследствие большого размера получающихся моделей.

Точность прогнозирования случайного леса зависит от ряда факторов – количества показателей в случайном наборе, объема подвыборки (случайной выборки из обучающего набора), количества деревьев, максимальной глубины деревьев (максимального количества уровней), максимального количества узлов в деревьях, минимального числа объектов в листьях, минимального количества объектов в дочернем узле.

Модуль случайного леса включен в библиотеку scikit-learn в языке Python, поэтому задача легко программируется. Однако часто удобнее воспользоваться реализацией этого метода, включенной в систему Statistica [15], который позволяет варьировать различные факторы, влияющие на качество обучения, и может быть использован для решения поставленной задачи мультиклассовой классификации для диагностики состояния технического объекта по результатам мониторинга показателей его функционирования.

Численное исследование

Для наблюдения за процессом функционирования компьютера проводился тест его характеристик с помощью встроенных функций программы AIDA64 Extreme вместе с параллельной нагрузкой другими программами в течение определенного периода времени. Исследовалось влияние различных показателей работы компьютера (загрузки и температуры процессора и ядер, динамической памяти, напряжения, мощности и других – всего 9 показателей $X_1 \dots X_9$) на его состояние: класс 1 – компьютер исправен и 4 вида неисправностей: класс 2 – имело место зависание, класс 3 – искажение изображения, 4 – заторможенность курсора, 5 – заедание звука.

В табл. 1 показана часть исходных данных, из которых случайным образом формировалась обучающая и тестовая выборки. Первые девять столбцов – это матрица X показателей функционирования системы, десятый – вектор-столбец Y – номера классов.

Таблица 1

Часть исходной выборки

X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	Y
8	23	15	0	113	50	45	0,817	4,78	1
25	17	17	10	97	50	52	1,013	2,69	1
15	38	15	202	97	50	44	0,693	5,88	1
25	44	7	10	101	46	43	0,693	2,27	1
22	29	18	202	101	46	51	1,015	1,79	1
25	44	25	202	102	46	44	0,908	2,08	1
25	100	100	1252	184	61	60	1,013	5,58	2
25	100	100	1252	184	60	62	1,009	10,92	2
25	100	100	1252	184	63	65	1,009	10,83	2
25	100	48	1752	171	58	61	1,013	8,17	3
25	100	100	1252	128	66	70	1,009	10,43	3
8	100	100	1252	83	49	68	1,009	6,69	5
25	100	100	1252	85	64	64	1,009	10,81	5
25	100	100	1252	85	64	62	1,013	10,71	5
8	12	12	1752	76	65	51	0,688	9,75	1
8	11	18	1752	76	58	57	1,011	6,49	1
22	25	29	1752	82	48	53	1,011	1,51	1

Всего получено 345 наблюдений, из которых нарушения имели место в 126 случаях (37 %), распределение нарушений по классам представлено в табл. 2. Например, состояние $y = 3$ (искажение изображения) имело место в 32 наблюдениях.

Таблица 2

Распределение классов

Класс	Количество
1	219
2	36
3	32
4	29
5	29

Таким образом, задача исследования – используя матрицу X показателей функционирования компьютерной системы размерностью 345 строк и 9 столбцов и вектор-столбец ответов о состоянии системы Y , разработать модель классификатора, которая обеспечивала бы по введенным данным функционирования компьютера диагностику одного из пяти возможных состояний.

Для решения задачи использовался модуль «случайный лес» локализованной версии 13.3 пакета Statistica. Настройки показаны на рис. 1: приняты доля тестовой выборки – 0,3 (30 % от всего набора данных), доля подвыборки – 0,5; число случайных показателей (предикторов) – 4 и т.д.

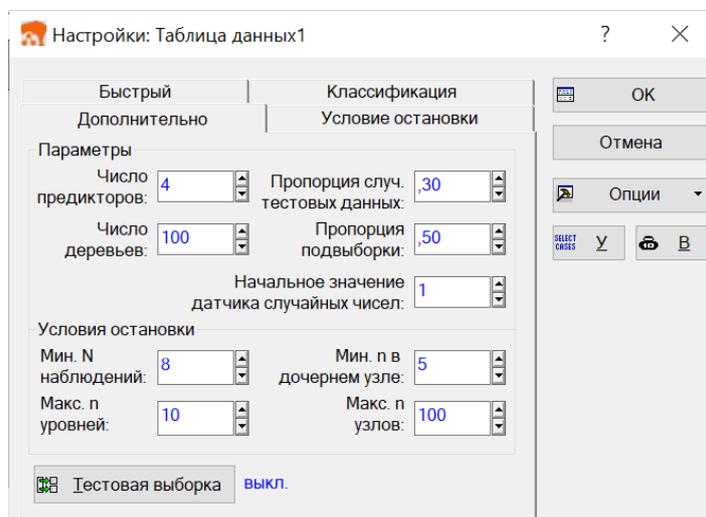


Рис. 1. Настройки «случайного леса»

На рис. 2 показан ход процесса построения «случайного леса»: по горизонтальной оси отложено количество деревьев, по вертикальной – доля ошибок классификации на обучающей (синяя линия) и тестовой (красная линия) выборках. Видно, что процесс стабилизировался уже при 40 деревьях (хотя в настройках указано 100 деревьев, при необходимости для повышения точности можно добавить заданное количество деревьев): при этом на обучающей выборке ошибок нет, на тестовой выборке доля ошибок 0,01.

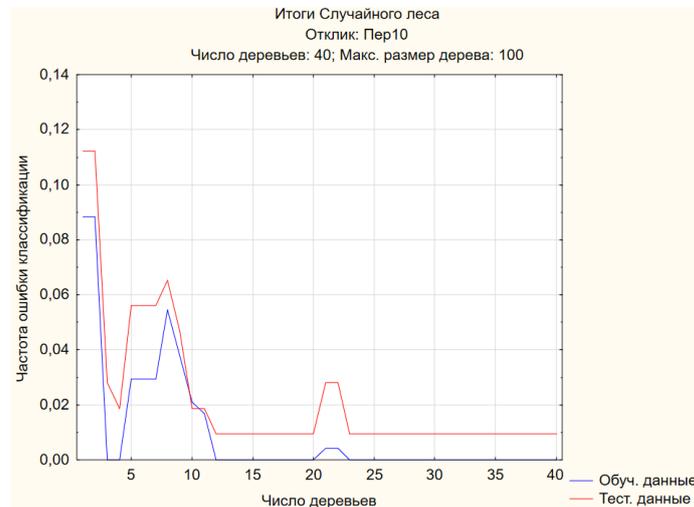


Рис. 2. Процесс построения «случайного леса»

Матрица классификации для тестовой выборки показана на рис. 3: наблюдение 3-го класса ошибочно отнесено к первому; остальные наблюдения классифицированы верно: это 57 наблюдений класса 1, когда компьютер работал исправно, 15 наблюдений 2-го класса, 14 – 4-го класса и 10 наблюдений 5-го класса.

Матрица классификации (к)					
Отклик: Пер10					
Тестовая выборка; Число деревьев: 40					
	Класс Предск. 1	Класс Предск. 2	Класс Предск. 3	Класс Предск. 4	Класс Предск. 5
Наблюд. 1	57,00000				
Наблюд. 2		15,00000			
Наблюд. 3	1,00000		10,00000		
Наблюд. 4				14,00000	
Наблюд. 5					10,00000

Рис. 3. Матрица классификации

Программа автоматически ранжирует показатели функционирования по значимости (рис. 4), что позволяет при большом их количестве сократить наименее значимые показатели. В нашем исследовании наиболее значимыми оказались показатели X9 и X5, наименее значимым – X4. Из графика дерева (рис. 5) видно, что вначале разделение проводится по показателю X9, затем – X5 и т.д.

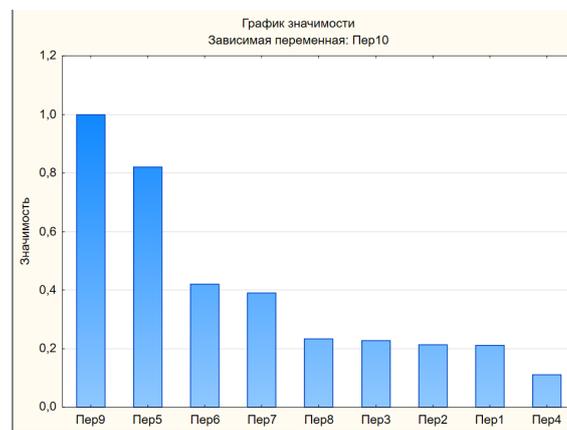


Рис. 4. Гистограмма значимости показателей

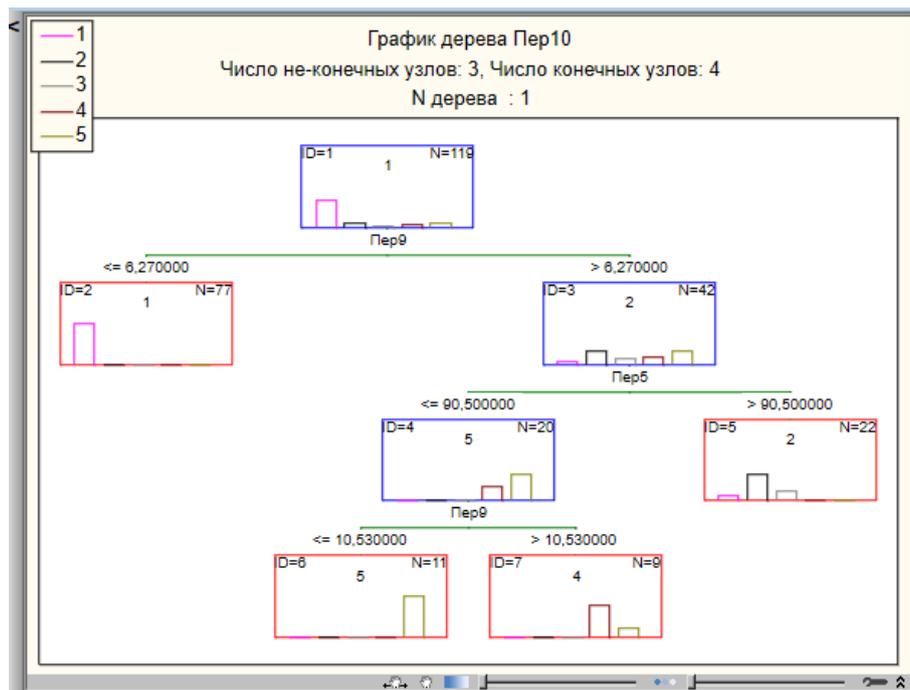


Рис. 5. График дерева

Заключение

Разработана технология мультиклассовой диагностики технических систем с применением «случайного леса» в системе Statistica. На примере диагностики компьютерной системы показано, что использование этого метода обеспечивает достаточно высокую точность классификации: доля ошибок на тестовой выборке составила 0,01. В случае несбалансированности классов в качестве критерия классификации вместо доли ошибок используется F -мера. Точность классификации повышается путем добавления деревьев. При необходимости количество показателей функционирования может быть сокращено с учетом их значимости.

Список литературы

1. Биргер И. А. Техническая диагностика. М. : Машиностроение, 1978. 240 с.
2. Клячкин В. Н., Крашенинников В. Р., Кувайскова Ю. Е. Прогнозирование и диагностика стабильности функционирования технических объектов. М. : Русайнс, 2020. 200 с.
3. Северцев Н. А., Бецков А. В., Дарьина А. Н. Методы и модели создания автоматизированных средств контроля для повышения безопасности функционирования технических систем // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 2. С. 19–26.
4. Юрков Н. К. Риски отказов сложных систем // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 1. С. 18–24.
5. Воронина В. В., Михеев А. В., Ярушкина Н. Г., Святов К. В. Теория и практика машинного обучения : учеб. пособие. Ульяновск : УлГТУ, 2017. 290 с.
6. Васильев В. И., Жернаков С. В. Классификация режимов работы ГТД с использованием технологии нейронных сетей // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2009. Т. 12. С. 53–56.
7. Жернаков С. В., Гильманшин А. Т. Применение интеллектуальных алгоритмов на основе нечеткой логики и нейронных сетей для решения задач диагностики отказов авиационного ГТД // Intelligent Technologies for Information Processing and Management (ITIPM'2014) : proceedings of the 2nd International Conference. 2014. P. 112–115.
8. Жуков Д. А. Анализ критериев качества классификации при диагностике функционирования технического объекта // Автоматизация процессов управления. 2019. № 3. С. 112–117.
9. Breiman L. Random Forests // Machine Learning. 2001. Vol. 45, № 1. P. 5–32.
10. Neykov M., Liu J. S., Cai T. On the Characterization of a Class of Fisher-Consistent Loss Functions and its Application to Boosting // Journal of Machine Learning Research. 2016. № 17. P. 1–32.
11. Wyner A. J., Olson M., Bleich J., Mease D. Explaining the Success of AdaBoost and Random Forests as Interpolating Classifiers // Journal of Machine Learning Research. 2017. № 18. P. 1–33.

12. Davis J., Goadrich M. The relationship between Precision-Recall and ROC curves // Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning. Pittsburgh. 2006. P. 233–240.
13. Wang B., Zou H. A Multicategory Kernel Distance Weighted Discrimination Method for Multiclass Classification // *Technometrics*. 2019. Vol. 61. P. 396–408. doi: 10.1080/00401706.2018.1529629
14. Клячкин В. Н., Донцова Ю. С. Сравнительный анализ точности нелинейных моделей при прогнозировании состояния системы на основе марковской цепи // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15, № 4-4. С. 924–927.
15. Боровиков В. П. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере. 2-е изд. СПб. : Питер, 2003. 700 с.

References

1. Birger I.A. *Tekhnicheskaya diagnostika = Technical diagnostics*. Moscow: Mashinostroenie, 1978:240. (In Russ.)
2. Klyachkin V.N., Krashennnikov V.R., Kuvayskova Yu.E. *Prognozirovanie i diagnostika stabil'nosti funkcionirovaniya tekhnicheskikh ob"ektov = Forecasting and diagnostics of the stability of the functioning of technical facilities*. Moscow: Rusayns, 2020:200. (In Russ.)
3. Severtsev N.A., Betskov A.V., Dar'ina A.N. Methods and models of creation of automated control tools to improve the safety of functioning of technical systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2019;(2):19–26. (In Russ.)
4. Yurkov N.K. Risks of failures of complex systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2014;(1):18–24. (In Russ.)
5. Voronina V.V., Mikheev A.V., Yarushkina N.G., Svyatov K.V. *Teoriya i praktika mashinnogo obucheniya: ucheb. posobie = Theory and practice of machine learning : textbook*. Ulyanovsk: UIGTU, 2017:290. (In Russ.)
6. Vasil'ev V.I., Zhernakov S.V. Classification of GTE operation modes using neural network technology. *Vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*. 2009;12:53–56. (In Russ.)
7. Zhernakov S.V., Gil'manshin A.T. Application of intelligent algorithms based on fuzzy logic and neural networks for solving problems of failure diagnostics of aviation GTE. *Intelligent Technologies for Information Processing and Management (ITIPM'2014): proceedings of the 2nd International Conference*. 2014:112–115. (In Russ.)
8. Zhukov D.A. Analysis of classification quality criteria in the diagnosis of the functioning of a technical object. *Avtomatizatsiya protsessov upravleniya = Automation of control processes*. 2019;(3):112–117. (In Russ.)
9. Breiman L. Random Forests. *Machine Learning*. 2001;45(1):5–32.
10. Neykov M., Liu J.S., Cai T. On the Characterization of a Class of Fisher-Consistent Loss Functions and its Application to Boosting. *Journal of Machine Learning Research*. 2016;(17):1–32.
11. Wyner A.J., Olson M., Bleich J., Mease D. Explaining the Success of AdaBoost and Random Forests as Interpolating Classifiers. *Journal of Machine Learning Research*. 2017;(18):1–33.
12. Davis J., Goadrich M. The relationship between Precision-Recall and ROC curves. *Proceedings of the 23rd international conference on Machine learning*. Pittsburgh. 2006:233–240.
13. Wang B., Zou H. A Multicategory Kernel Distance Weighted Discrimination Method for Multiclass Classification. *Technometrics*. 2019;61:396–408. doi:10.1080/00401706.2018.1529629
14. Klyachkin V.N., Dontsova Yu.S. Comparative analysis of the accuracy of nonlinear models in predicting the state of a system based on a Markov chain. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2013;15(4-4):924–927. (In Russ.)
15. Borovikov V.P. *STATISTICA. Iskustvo analiza dannykh na komp'yutere = The art of data analysis on a computer*. 2nd ed. Saint Petersburg: Piter, 2003:700. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Николаевич Клячкин

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры прикладной
математики и информатики,
Ульяновский государственный
технический университет
(Россия, г. Ульяновск, ул. Северный Венец, 32)
E-mail: v_kl@mail.ru

Vladimir N. Klyachkin

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department
of applied mathematics and informatics,
Ulyanovsk State Technical University
(32 Severny Venec street, Ulyanovsk, Russia)

Ирина Николаевна Карпунина

кандидат технических наук,
доцент кафедры общепрофессиональных дисциплин,
Ульяновский институт гражданской авиации
(Россия, г. Ульяновск, ул. Можайского, 8/8)
E-mail: karpunina531@yandex.ru

Irina N. Karpunina

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department of OPD,
Ulyanovsk Institute of Civil Aviation
(8/8 Mozhaiskiy street, Ulyanovsk, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 15.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 10.01.2022

Принята к публикации/Accepted 15.02.2022

ДЕРЕВЬЯ РЕШЕНИЙ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ МЕМРИСТОРОВ

А. Ю. Доросинский¹, О. В. Прокофьев², М. А. Линкова³, И. Ю. Семочкина⁴

¹ Научно-производственное предприятие «Сонар», Пенза, Россия
^{2,3,4} Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия
¹ antik_r13@mail.ru, ² prokof_ow@mail.ru, ³ m_linkova@mail.ru, ⁴ ius1961@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Несмотря на значительный прогресс к нейробиологии в последнее время, понимание принципов и механизмов, лежащих в основе сложных функций мозга и познания, остается неполным. Моделирование и физическая реализация центра принятия решений, аналогичного естественным процессам мозга, являются средством построения киберфизической системы для широкого круга прикладных задач, связанных с поддержкой принятия решений. *Материалы и методы.* Открытие мемристоров, выявление технической возможности запоминания и хранения аналоговой информации служат технологической платформой для создания деревьев принятия решений. Нейроны, участвующие в обработке информации и хранении данных, динамически устанавливающие связи между собой, также реализуются мемристорами, управляемыми напряжением. Методы нейробиологии, сетевые модели и методы расчетов схем микроэлектроники на базе мемристоров используются здесь в едином комплексе для запоминания, обработки информации и принятия решений. *Результаты.* Открываемые преимущества позволяют не только применять устройства хранения информации большей емкости, вытесняющие традиционную флеш-память, но и применять деревья принятия решений с узлами ветвления, реализованными на уровне молекул. В заключении обоснован вывод о возможности создания систем поддержки принятия решений нового поколения, сочетающих современные средства визуализации деревьев и применения библиотек решений. *Выводы.* Таким образом, возможно объединение преимуществ советующей, объясняющей системы и экспертной системы, самостоятельно вырабатывающей решение, если того потребует задача в предметной области. Разработка микроэлектронных мемристоров позволяет разработать интеллектуальные системы поддержки принятия решений нового поколения, имитирующие биологические процессы человеческого мозга, в которых процессы обучения, создания, запоминания и хранения деревьев решений реализуются на единой технологической и схемотехнической базе.

Ключевые слова: деревья решений, мемристоры, поддержка принятия решений

Для цитирования: Доросинский А. Ю., Прокофьев О. В., Линкова М. А., Семочкина И. Ю. Деревья решений на основе технологии мемристоров // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 53–60. doi:10.21685/2307-4205-2022-2-6

DECISION TREES BASED ON MEMRISTOR TECHNOLOGY

A.Yu. Dorosinskiy¹, O.V. Prokofev², M.A. Linkova³, I.Yu. Semochkina⁴

¹ Research and production enterprise «Sonar», Penza, Russia
^{2,3,4} Penza State Technological University, Penza, Russia
¹ antik_r13@mail.ru, ² prokof_ow@mail.ru, ³ m_linkova@mail.ru, ⁴ ius1961@gmail.com

Abstract. *Background.* Despite significant progress in neuroscience recently, understanding of the principles and mechanisms underlying complex brain functions and cognition remains incomplete. Modeling and physical implementation of the decision-making center, similar to the natural processes of the brain, is a means of building a cyber-physical system for a wide range of applied tasks related to decision support. *Materials and methods.* The discovery of memristors, the identification of the technical possibility of memorizing and storing analog information serve as a technological platform for creating decision trees. Neurons involved in information processing and data storage, dynamically establishing connections among themselves, are also implemented with voltage-controlled memristors. Neurobiology methods, network models and methods for calculating microelectronics circuits based on memristors are used here in a single complex for memorizing, processing information and making decisions. *Results.* The advantages that are being discovered allow not only to use information storage devices of higher capacity, replacing traditional flash memory, but also to use decision trees with branching nodes implemented at the molecular level. In conclusion, the inference is substantiated about the possibility of creating a new generation of decision support systems combining modern visualization tools of trees and the use of decision libraries. *Conclusions.* Thus, it is possible

to integrate the advantages of an advisory, explanatory system and an expert system that independently develops a solution if a task in the subject area requires it. The development of microelectronic memristors makes it possible to develop intelligent decision support systems of a new generation that simulate the biological processes of the human brain, in which the processes of learning, creating, memorizing and storing decision trees are implemented using a single technological and circuit-based base.

Keywords: decision trees, memristors, decision support

For citation: Dorosinskiy A.Yu., Prokofev O.V., Linkova M.A., Semochkina I.Yu. Decision trees based on memristor technology. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(2):53–60. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-2-6

Нейробиологический метод сетевого моделирования познания

Человеческий мозг представляет собой сложный парадокс: несмотря на фиксированную анатомию, характеризующуюся связностью, его функциональный репертуар обширен, позволяя действовать, осуществлять восприятие и познание. Это контрастирует с такими органами, как сердце, которые имеют динамическую анатомию, но имеют только одну функцию. Разрешение этого парадокса может заключаться в сетевой архитектуре мозга, которая организует локальные взаимодействия, чтобы справиться с разнообразными требованиями окружающей среды, обеспечивая адаптивность, надежность, устойчивость к повреждениям, эффективную передачу сообщений и разнообразную функциональность при наличии фиксированной структуры. Каким образом разнообразные функции возникают из статической нейронной архитектуры? Объяснение может заключаться в том, что появление динамической функциональной связности из статических структурных связей требует формальных (вычислительных) подходов к обработке нейронной информации, которые могут разрешить диалектику между структурой и функцией. Во многом наше понимание взаимосвязей мозга основывается на способе их измерения и моделирования [1]. Подход к их описанию основан на теории графов, целью которой является построение сетевой топологии (ненаправленных) соединений того типа, который измеряется неинвазивной визуализацией анатомических связей и функциональной связности (корреляции) между удаленными участками мозга. Это сравнивается с основанными на моделях определениями контекстно-зависимой (направленной) эффективной связи, которые основаны на биофизике взаимодействий нейронов. Топологический сетевой анализ цепей мозга показывает, что модульные и иерархические структурные сети особенно подходят для функциональной интеграции локальных (функционально специализированных) нейронных операций, лежащих в основе познания. Измерения спонтанной активности выявляют паттерны функциональной связи, аналогичные структурной связности, предполагая, что структурные сети ограничивают функциональные сети. Однако ответы, связанные с задачами, которые требуют контекстно-зависимой интеграции, выявляют расхождение между функцией и структурой, которое, по видимому, основано преимущественно на дальнедействующих связях. В отличие от методов, которые феноменологически описывают топологию сети, теоретические и вычислительные подходы, основанные на моделях, сосредотачиваются на механизмах взаимодействия нейронов, которые обеспечивают динамическую реконфигурацию эффективного соединения. Существует соответствие между иерархическими топологиями (основанными на структурной и функциональной связности) и эффективными связями, которые потребуются для иерархической передачи сообщений того типа, который предлагается вычислительной нейробиологией. Нейроморфное оборудование, а также искусственные нейронные сети представляют собой чрезвычайно упрощенные модели того, как мозг работает или обрабатывает информацию, с гораздо меньшей сложностью с точки зрения размера и функциональной технологии и гораздо более регулярной структурой с точки зрения возможности подключения. Сравнение нейроморфных чипов с мозгом – очень грубое сравнение, подобное сравнению самолета с птицей только потому, что у них обоих есть крылья и хвост. Дело в том, что нейронные когнитивные системы на много порядков более энергоемкие и вычислительные, чем современный искусственный интеллект, и нейроморфная инженерия – это попытка сократить этот разрыв. Как показали исследования [2–5], вопрос о физической реализации процессов, аналогичных существующим в области мозга, можно решить на основе технологии мемристоров.

Мемристоры как компонент элементной базы

Чуа в своей статье в 1971 г. определил теоретическую симметрию между нелинейным резистором (напряжение в зависимости от тока), нелинейным конденсатором (напряжение в зависимости от заряда) и нелинейным индуктором (связь магнитного потока в зависимости от тока) [2].

Из этой симметрии он вывел характеристики четвертого фундаментального элемента нелинейной схемы, связывающего магнитный поток и заряд, который он назвал мемристором. В отличие от линейного (или нелинейного) резистора мемристор имеет динамическую взаимосвязь между током и напряжением, включая память о прошлых напряжениях или токах. Мемристор – это электрический компонент, который имеет сопротивление электрическому току, но сопротивление изменяется в зависимости от направления тока. Когда ток не течет, мемристор сохраняет последнее состояние, в котором он был, поэтому, по сути, представляет собой аналоговую схему памяти. Мемристоры могут выполнять как логические операции, так и операции хранения [3]. Чуа вывел закон о существовании мемристоров из математических соотношений между элементами схемы. Четыре величины контура (заряд, ток, напряжение и магнитный поток) могут быть связаны друг с другом шестью способами. Две величины регулируются основными физическими законами, а три – известными элементами схемы (резистор, конденсатор и индуктор). Это оставляет одно возможное отношение неучтенным. Основываясь на этой реализации, Чуа предложил мемристор использовать для математических моделей как класс схемных элементов, основанных на соотношении между зарядом и потоком (рис. 1).

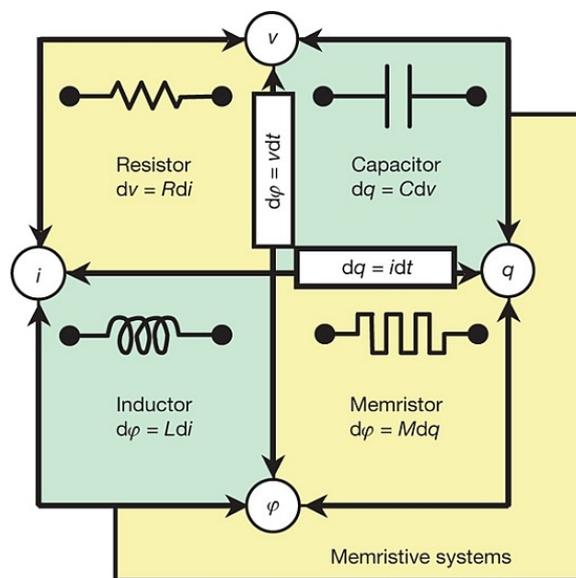


Рис. 1. Базовый набор элементов электротехники по Чуа [4]

Устройство на мемристорах в своей работе довольно отчетливо напоминает функционирование синапсов, т.е. точек контакта между нервными клетками у живых организмов вообще и в мозге в частности. Хотя тайны работы мозга пока что нельзя называть постигнутыми, работа памяти определяется тем, какие нейроны мозга связаны друг с другом и насколько эти связи сильны. Соответственно, процесс запоминания трактуется как изменение силы этих связей под действием ощущений, порождающих сигналы в нейронной сети мозга. Увидев аналогию для данных процессов в работе своего устройства, в HP Labs [5] предположили, что можно попытаться скопировать структуру мозга, построив нейроны из транзисторов, а синапсы заменив мемристорами. О первом успехе на данном направлении стало известно, когда объявили о разработке образцов ячеек со стороной 3 нм и скоростью переключения порядка одной наносекунды. Попутно ученым удалось создать из таких элементов компактный 3D-массив на чипе, способный выполнять логические операции и работающий аналогично синапсам, т.е. сигнальным линиям между клетками нейронов в человеческом мозге. Аналогию работы поясняют так. Скорость передачи сигнала по синапсу зависит от времени активации нейронов: чем меньше временной промежуток между активациями, тем быстрее передается сигнал по синапсу. Точно так же работает и массив мемристоров: при подаче тока с интервалами 20 мс сопротивление мемристора вдвое меньше, чем при интервалах 40 мс.

Молекулярный процессор на технологии мемристоров

Обильные дендритно-синаптические взаимосвязи между нейронами в неокортексе включают сложные логические структуры, позволяющие принимать сложные решения, которые значительно

превышают любые искусственные электронные аналоги. Физическая сложность намного превосходит существующие технологии изготовления схем: более того, сеть в мозге динамически реконфигурируется, что обеспечивает гибкость и адаптируемость к изменяющимся условиям. Напротив, современные полупроводниковые логические схемы основаны на пороговых переключателях, которые жестко подключены для выполнения заранее определенных логических функций. Чтобы повысить производительность логических схем, разработчики [6] предложили основные элементы электронных схем, выражая сложную логику в свойствах материалов в нанометровом масштабе. При этом используется управляемая напряжением условная логическая взаимосвязь между пятью различными молекулярными окислительно-восстановительными состояниями металлоорганического комплекса, чтобы встроить «заросли» деревьев решений (состоящих из нескольких условных операторов if-then-else), имеющих 71 узел в одном мемристоре. Результирующая вольт-амперная характеристика этого молекулярного мемристора («резистора памяти», глобального пассивного элемента схемы резистивного переключателя, который аксиоматически дополняет набор конденсаторов, катушка индуктивности и резистор) демонстрирует восемь рекуррентных и зависящих от истории энергонезависимых переходов переключения между двумя уровнями проводимости за один цикл развертки. Идентичность каждого окислительно-восстановительного состояния молекул была определена с помощью спектроскопии комбинационного рассеяния на месте и подтверждена квантово-химическими расчетами, раскрывающими механизм переноса электронов. Используя схемы, состоящие только из этих элементов, экспериментально доказана работа динамически реконфигурируемой, коммутативной и некоммутирующей логики с отслеживанием состояния в многомерных деревьях решений, которые выполняются за один временной шаг и могут, например, применяться в качестве локального интеллекта в граничных вычислениях (рис. 2).

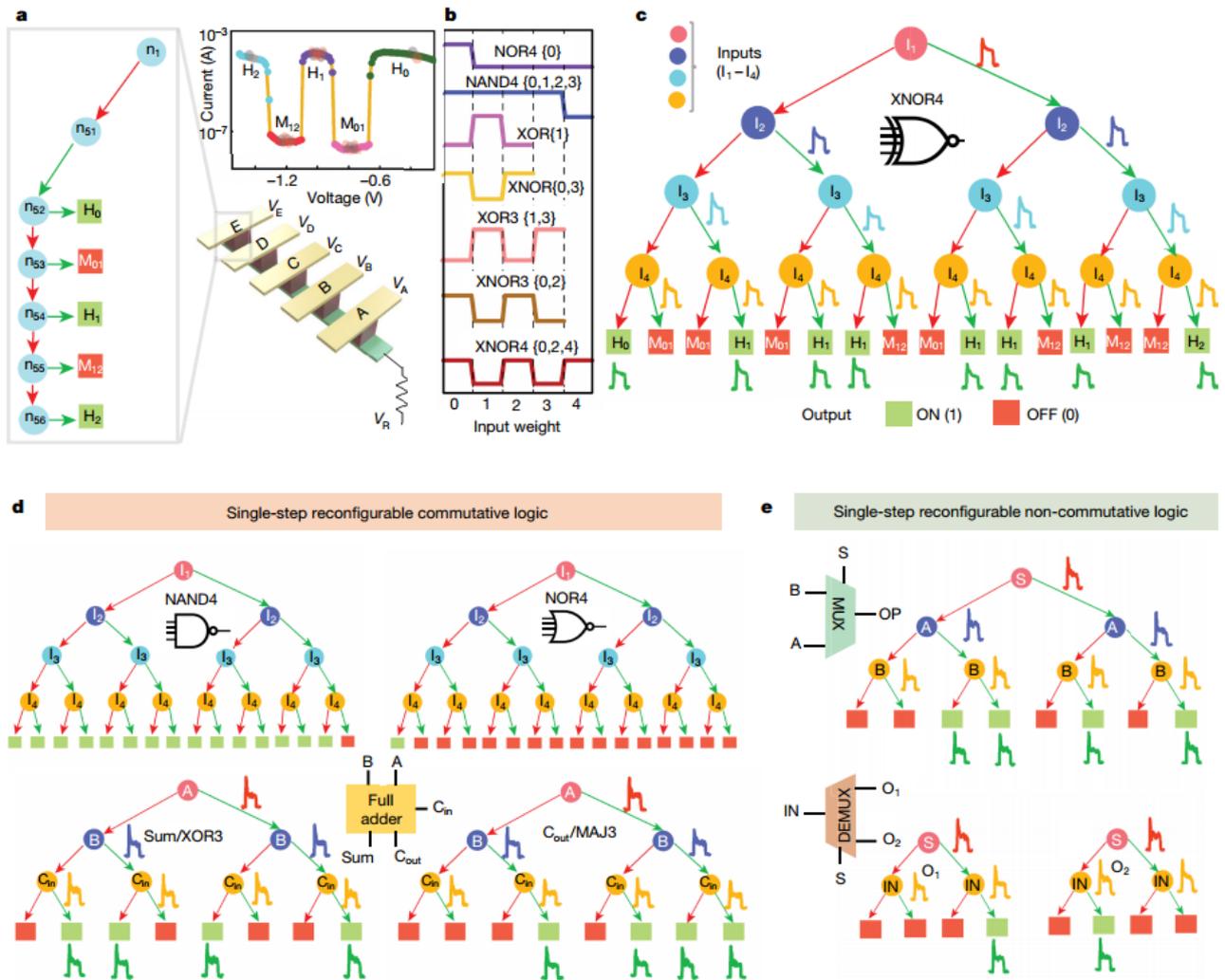


Рис. 2. Многомерные деревья принятия решений в молекулярном процессоре [6]

В отличие от традиционной цифровой логической схемы, пороговые переключатели обеспечивают двоичные состояния, соединенные в различных конфигурациях для создания логических вентилей и вычислительных схем, предложен другой подход: закрепление сложных логических возможностей в свойствах материала отдельного элемента схемы и динамическом выборе тех из них, которые необходимы. Задача заключалась в том, чтобы раскрыть физический механизм, который мог бы обеспечить множественные немонотонные условные переходы переключения. Выявлен молекулярный окислительно-восстановительный механизм, который может предоставить удобную платформу для реализации такой функциональности. На рис. 3 показана молекулярная структура материала элемента схемы.

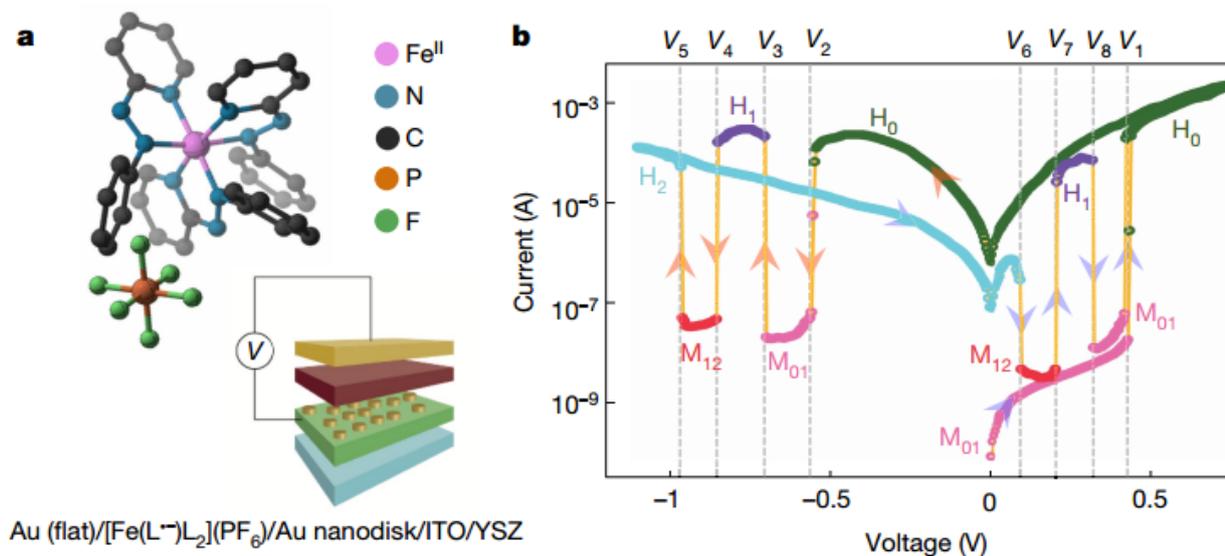


Рис. 3. Структура молекулярного процессора [6]

Нет необходимости в промежуточной операции чтения для преобразования проводимости в ток или для перемещения бит в другое место – все операции выполняются внутри памяти в определенных ячейках с измененной схемой записи в память. Таким образом уменьшаются затраты времени и электроэнергии. Применение этих элементов схемы может охватывать широкий диапазон областей принятия решений, в том числе в автономных устройствах, в периферийных и мобильных устройствах, в случаях нестабильного источника питания. Вычисления с отслеживанием состояния в памяти с использованием оксидных мемристоров уже показывают более высокую энергоэффективность и компактность.

Пять различных окислительно-восстановительных состояний в молекулярных пленках условно взаимосвязаны посредством приложения напряжения, и конкретный переход между состояниями определяется историей приложенного напряжения. Принимая во внимание эти условия, вольт-амперную характеристику элемента схемы можно описать как «чашу решений» (рис. 4), определяемую как набор деревьев решений, каждое из которых состоит из выражений «если-то-иначе».

Нет необходимости в промежуточной операции чтения для преобразования проводимости в ток или для перемещения бит в другое место – все операции выполняются внутри памяти в определенных ячейках с измененной схемой записи в память. Таким образом уменьшаются затраты времени и электроэнергии. Применение этих элементов схемы может охватывать широкий диапазон областей принятия решений, в том числе в автономных устройствах, в периферийных и мобильных устройствах, в случаях нестабильного источника питания. Вычисления с отслеживанием состояния в памяти с использованием оксидных мемристоров уже показывают более высокую энергоэффективность и компактность. Основываясь на логическом параллелизме, избыточности и реконфигурируемости, элементы схемы могут обеспечить дальнейший прогресс в эффективности вычислений за счет существенного снижения количества шагов вычисления, количества устройств и затрачиваемой энергии.

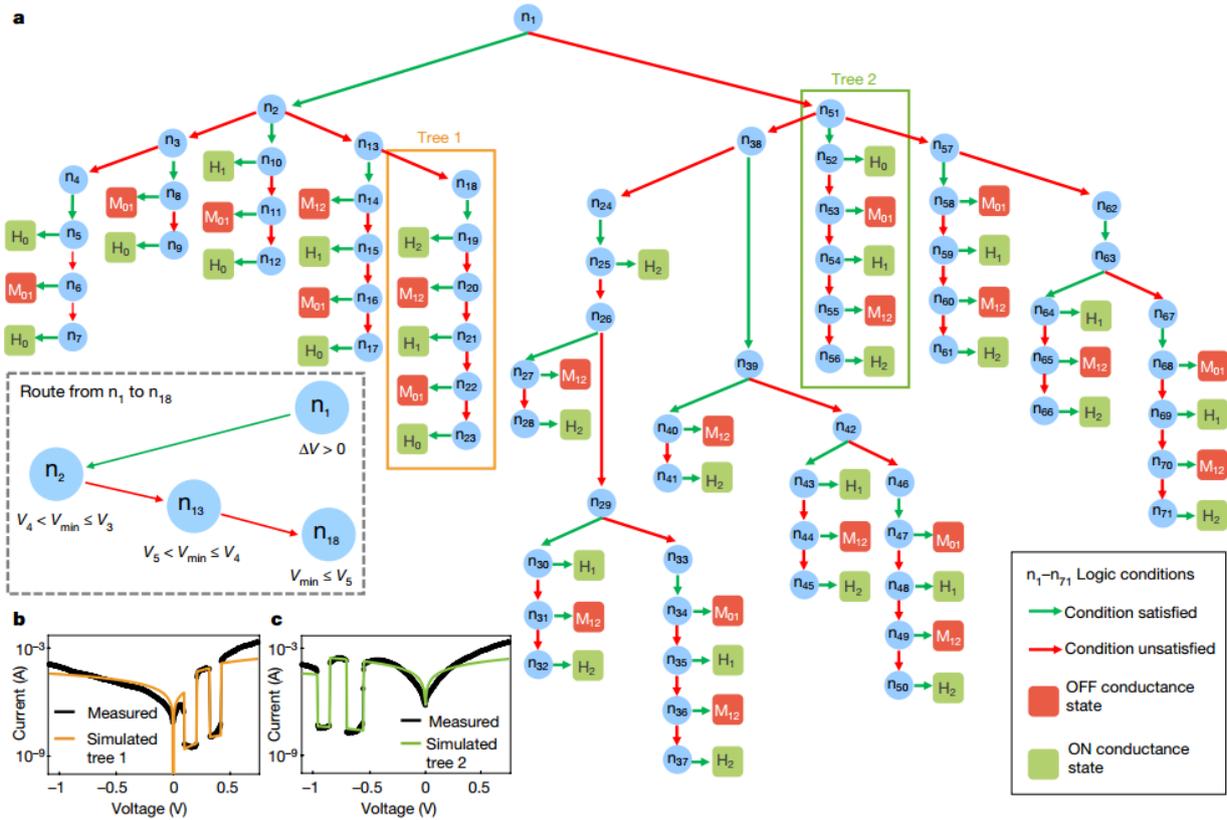


Рис. 4. Деревья решений в пределах одного элемента схемы молекулярной пленки

Заключение

Нейронные взаимодействия реализуют собой динамику фиксированной структурной связи, которая лежит в основе познания и поведения. Такое отклонение функции от структуры, возможно, является наиболее неизученным свойством мозга и требует интенсивных исследований в будущем. Изучая динамику и самоорганизацию функциональных сетей, мы можем понять истинную природу мозга как воплощения разума. Диапазон возможностей функциональных сетей основан на скрытой структурной архитектуре соединений, которая обеспечивает иерархическую функциональную интеграцию. Для понимания этих сетей потребуются теоретические модели нейронной обработки данных, лежащей в основе познания.

Рассматривая новые тенденции в сетевой нейробиологии, можно отметить перспективность пути к лучшему пониманию мозга как многомасштабной сетевой системы. Исследуя механизмы познания, сетевая нейробиология ищет новые способы описания топологии, записи, анализа и моделирования элементов структуры мозга. В основе этого подхода лежат две параллельные тенденции: доступность новых эмпирических инструментов для создания всеобъемлющих карт и регистрации динамических паттернов между молекулами, нейронами, областями мозга и теоретическая основа, вычислительные инструменты, информационные сетевые модели. Конвергенция эмпирических и вычислительных достижений открывает новые горизонты научных исследований, включая динамику сети, изучение и контроль сетей мозга, а также привязки сетевых процессов к пространственно-временным областям.

Технический аналог участков мозга, отвечающих за обработку информации и запоминание, имеет теоретическое обоснование, сверхкомпактную реализацию в области физики атомов, обладает воспроизводимостью и сохраняемостью характеристик. Основываясь на логическом параллелизме, избыточности и реконфигурируемости, элементы мемристорной схемы могут обеспечить дальнейший прогресс в эффективности вычислений за счет существенного снижения количества шагов вычисления, количества устройств и затрачиваемой энергии. Таким образом, определена предпосылка создания обучаемых систем, осуществляющих поддержку принятия решений и выработку рекомендаций на основе гибкой формируемой структуры деревьев решений [7]. В сочетании с современными

ми способами визуализации деревьев [8] подобная мозгу мемристорная структура становится новой перспективной возможностью для разработчиков повышения эффективности интеллектуальных информационных систем.

Возникшая возможность создания гибридных систем поддержки принятия решений [9] позволит перейти к итеративным решениям задачи, сложной для восприятия человеком, совместно искусственным интеллектом и человеком, причем они будут обладать сопоставимой степенью приоритета. Таким образом, сочетание безусловной памяти, высокой скорости процессов и человеческой интуиции может дать более высокий уровень результатов.

Индивидуализация и персонификация искусственного интеллекта позволит создать «цифрового аватара», понимаемого как набор данных, создаваемых человеком в цифровом мире. Аватароподобная технология может помочь в поиске высококвалифицированных специалистов для решения прикладных задач. Метрологические когнитивные технологии позволят создать более полные наборы данных для обучения систем искусственного интеллекта, для проверки результатов обучения на новых данных. Станет возможным составление «наилучшей» модели машинного обучения, представляющей собой композицию библиотек, методов, алгоритмов из значительного числа вариантов. Таким образом, творческое начало в решении прикладных задач на базе известных методов машинного обучения может быть применено при работе с большими данными. Станет доступным решение задач генеративного дизайна сущностей реального мира, когда, например, технологию производства можно будет проектировать вместе с графиком работы, требованиями к персоналу, порядком найма и обучения сотрудников. Перечисленное открывает множество новых направлений работы для разработчиков систем принятия решений нового поколения.

Список литературы

1. Park H.-J., Friston K. Structural and Functional Brain Networks: From Connections to Cognition // *Science*. 2013. Vol 342, iss. 6158. doi: 10.1126/science.1238411
2. Chua L. Memristor -The missing circuit element // *IEEE Transactions on Circuit Theory*. 1971. Vol. 18. P. 507–519. doi:10.1109/TCT.1971.1083337
3. Clark J. Memristors' one-year delay will hit IT in the wallet. 2012. URL: <https://www.zdnet.com/article/memristors-one-year-delay-will-hit-it-in-the-wallet/>
4. Adee S. The Mysterious Memristor Researchers at HP have solved the 37-year mystery of the memory resistor, the missing 4th circuit element. 2008. URL: <https://spectrum.ieee.org/the-mysterious-memristor>
5. Киви Б. Мемристоры: пора ли переписывать учебники? // *3DNews*. 2014. URL: <https://3dnews.ru/906763>
6. Goswami, S., Pramanick, R., Patra, A. [et al.]. Decision trees within a molecular memristor // *Nature*. 2021. Vol. 597. P. 51–56. URL: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03748-0>
7. Михеев М. Ю., Прокофьев О. В., Семочкина И. Ю. Древоподобные карты для повышения качества поддержки решений // *Надежность и качество сложных систем*. 2021. № 1. С.76–86. doi:10.21685/2307-4205-2021-1-8
8. Михеев М. Ю., Прокофьев О. В., Семочкина И. Ю. Способы применения древоподобных карт для поддержки принятия решений // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. 2020. Т. 1. С. 76–78.
9. Эксперт: гибрид человека и искусственного интеллекта появится в 2022 году // *РИА Новости*. 05.01.2022. URL: <https://ria.ru/20220105/ii-1766599568.html>

References

1. Park H.-J., Friston K. Structural and Functional Brain Networks: From Connections to Cognition. *Science*. 2013;342(6158). doi:10.1126/science.1238411
2. Chua L. Memristor -The missing circuit element. *IEEE Transactions on Circuit Theory*. 1971;18:507–519. doi:10.1109/TCT.1971.1083337
3. Clark J. *Memristors' one-year delay will hit IT in the wallet*. 2012. Available at: <https://www.zdnet.com/article/memristors-one-year-delay-will-hit-it-in-the-wallet/>
4. Adee S. *The Mysterious Memristor Researchers at HP have solved the 37-year mystery of the memory resistor, the missing 4th circuit element*. 2008. Available at: <https://spectrum.ieee.org/the-mysterious-memristor>
5. Kivi B. Memristors: Is it time to rewrite textbooks? *3DNews*. 2014. (In Russ.). Available at: <https://3dnews.ru/906763>
6. Goswami, S., Pramanick, R., Patra, A. [et al.]. Decision trees within a molecular memristor. *Nature*. 2021;597:51–56. Available at: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03748-0>
7. Mikheev M.Yu., Prokofev O.V., Semochkina I.Yu. Tree maps for improving the quality of decision support. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(1):76–86. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-1-8

8. Mikheev M.Yu., Prokofev O.V., Semochkina I.Yu. Methods of using tree maps to support decision-making. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2020;1:76–78. (In Russ.)
9. Expert: a hybrid of man and artificial intelligence will appear in 2022. *RIA Novosti = RIA News*. 05.01.2022. (In Russ.). Available at: <https://ria.ru/20220105/ii-1766599568.html>

Информация об авторах / Information about the authors

Антон Юрьевич Доросинский

кандидат технических наук,
генеральный директор,
Научно-производственное предприятие «Сонар»
(Россия, г. Пенза, ул. Центральная 1В)
E-mail: antik_r13@mail.ru

Олег Владимирович Прокофьев

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры информационных
технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: prokof_ow@mail.ru

Марина Алексеевна Линкова

магистрант,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: m__linkova@mail.ru

Ирина Юриевна Семочкина

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры информационных
технологий и систем,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, пр. Байдукова / ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: ius1961@gmail.com

Anton Yu. Dorosinskiy

Candidate of technical sciences,
general manager,
Scientific and production enterprise «Sonar»
(1V Tsentralnaya street, Penza, Russia)

Oleg V. Prokofev

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of informational technologies and systems,
Penza State Technological University
(1a/11 Baidukov's passage /Gagarina street, Penza,
Russia)

Marina A. Linkova

Master degree student,
Penza State Technological University
(1a/11 Baidukov's passage /Gagarina street, Penza,
Russia)

Irina Yu. Semochkina

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of informational technologies and systems,
Penza State Technological University
(1a/11 Baidukov's passage /Gagarina street, Penza,
Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 15.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 10.01.2022

Принята к публикации/Accepted 15.02.2022

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

DESIGN AND TECHNOLOGY IN INSTRUMENTATION AND RADIO ELECTRONICS

УДК 620.1.08.

doi:10.21685/2307-4205-2022-2-7

ИНФОРМАЦИОННАЯ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ НАДЕЖНОСТИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ

З. М. Селиванова¹, К. В. Скоморохов²

^{1,2} Тамбовский государственный технический университет, Тамбов, Россия
¹selivanova_zm@mail.ru, ²kirillv6812@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Прогнозирование изменения надежности интеллектуальной информационно-измерительной системы является актуальной задачей при определении теплофизических свойств теплоизоляционных, композитных, строительных и других материалов на производственных предприятиях. Отказ интеллектуальной измерительной системы заключается в превышении погрешности измерений компонентов системы, что приводит к неточности контроля теплофизических свойств материалов и снижению качества выпускаемых материалов на производстве. Оценка надежности системы на основе созданных информационной и математических моделей прогнозирования надежности позволит своевременно поддерживать работоспособность структурных компонентов измерительной системы, повысить точность измерительной информации для расчета параметров теплофизических свойств материалов и, следовательно, улучшить качество выпускаемой продукции. *Материалы и методы.* Прогнозирование надежности интеллектуальной информационно-измерительной системы выполнено на основе классической теории надежности, математического моделирования, теории вероятности и математической статистики, методов программного и аппаратного самоконтроля, алгоритма прогнозирования надежности измерительной системы. *Результаты.* Разработаны информационная и математические модели для прогнозирования надежности интеллектуальной информационно-измерительной системы теплофизических свойств материалов, база знаний, что способствует повышению вероятности безотказной работы данной системы. *Выводы.* Прогнозирование надежности интеллектуальной информационно-измерительной системы позволяет исключить нарушение работоспособности системы, повысить точность получаемых измерительных данных с объекта контроля и обеспечить достоверность определяемых теплофизических свойств материалов для повышения качества выпускаемой продукции на производственных предприятиях.

Ключевые слова: прогнозирование надежности, интеллектуальная измерительная система, теплофизические свойства материалов

Для цитирования: Селиванова З. М., Скоморохов К. В. Информационная и математические модели для прогнозирования надежности интеллектуальной информационно-измерительной системы теплофизических свойств материалов // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 61–69. doi:10.21685/2307-4205-2022-2-7

INFORMATION AND MATHEMATICAL MODELS FOR RELIABILITY PREDICTION OF INTELLIGENT INFORMATION-MEASURING SYSTEM OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF MATERIALS

Z.M. Selivanova¹, K.V. Skomorokhov²

^{1,2} Tambov State Technical University, Tambov, Russia

¹selivanova_zm@mail.ru, ²kirillv6812@gmail.com

Abstract. *Background.* Predicting the change in the reliability of an intelligent information-measuring system is an urgent task in determining the thermophysical properties of heat-insulating, composite, building and other materials at manufacturing enterprises. The failure of an intelligent measuring system consists in exceeding the measurement error of the system components, which leads to inaccurate control of the thermophysical properties of materials and a decrease in the quality of manufactured materials in production. Evaluation of system reliability based on the created information and mathematical models of reliability prediction will make it possible to maintain the efficiency of the structural components of the measuring system in a timely manner, improve the accuracy of measuring information for calculating the parameters of the thermophysical properties of materials and, therefore, improve the quality of products. *Materials and methods.* The prediction of the reliability of an intelligent information-measuring system is based on the classical theory of reliability, mathematical modeling, probability theory and mathematical statistics, methods of software and hardware self-control, and an algorithm for predicting the reliability of a measuring system. *Results.* Information and mathematical models have been developed to predict the reliability of an intelligent information-measuring system of thermophysical properties of materials, a knowledge base, which helps to increase the probability of failure-free operation of this system. *Conclusions.* Forecasting the reliability of an intelligent information-measuring system makes it possible to exclude a violation of the system's operability, improve the accuracy of the measurement data obtained from the control object and ensure the reliability of the determined thermophysical properties of materials to improve the quality of products manufactured at manufacturing enterprises.

Keywords: reliability prediction, intelligent measuring system, thermophysical properties of materials

For citation: Selivanova Z.M., Skomorokhov K.V. Information and mathematical models for reliability prediction of intelligent information-measuring system of thermophysical properties of materials. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(2):61–69. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-2-7

Введение

Контроль теплофизических свойств (ТФС) теплоизоляционных, композитных, строительных и других видов материалов с использованием интеллектуальной информационно-измерительной системы (ИИИС) необходим на производственных предприятиях для повышения качества выпускаемых материалов. На качество выпускаемой продукции оказывают влияние состав исходного сырья, технология изготовления, а также их теплофизические свойства, точность определения которых зависит от надежности ИИИС ТФС материалов. Надежность ИИИС при определении ТФС материалов – это свойство системы сохранять функции структурных компонентов без изменения во времени установленных эксплуатационных параметров в допустимых пределах и погрешность измерения измерительного канала ИИИС.

Методы прогнозирования надежности ИИИС ТФС материалов заключаются в оценке ожидаемого уровня надежности системы на основе информации о достигнутых значениях и выявленных тенденциях изменения прогнозируемой надежности измерительной системы, которая аналогична рассматриваемой ИИИС по назначению и принципу работы (ГОСТ Р 27.013–2019 (МЭК 62308:2006). Национальный стандарт российской федерации. Надежность в технике. Методы оценки показателей безотказности). Для оценки надежности ИИИС необходимо разработать информационную и математические модели прогнозирования надежности измерительной системы, математическую модель прогнозирования изменения теплопроводности материалов с течением времени, структурную схему ИИИС ТФС материалов с пополняемой базой знаний.

Материалы и методы

С учетом вышеизложенных задач разработана информационная модель для формирования математических моделей прогнозирования надежности и ИИИС теплофизических свойств материалов (рис. 1) [1, 2].

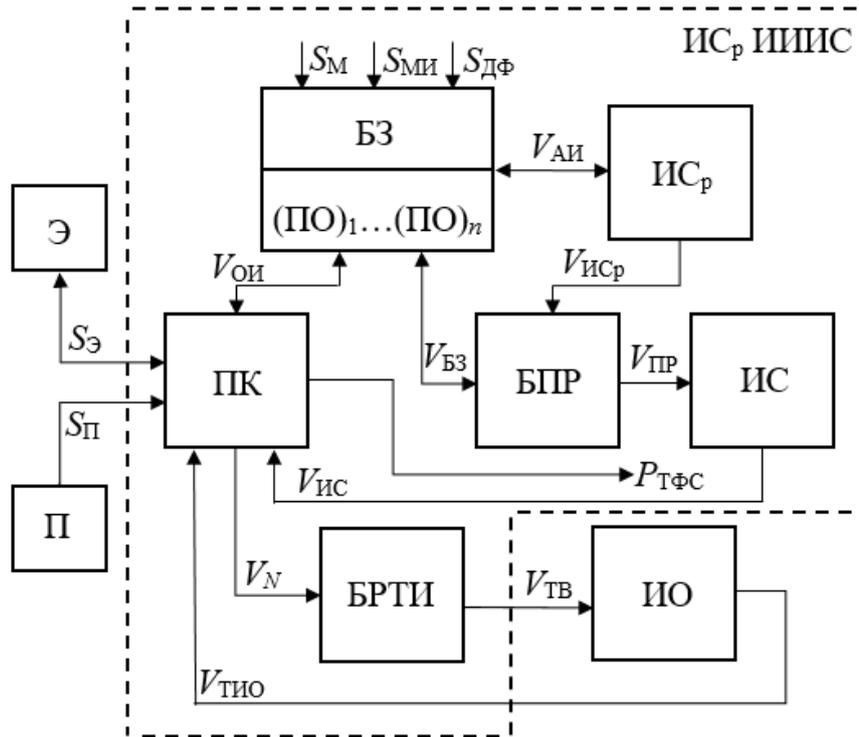


Рис. 1. Информационная модель ИИИС: ИСр – информационная среда; Э – эксперт; П – пользователь; БЗ – база знаний; ПК – персональный компьютер; БПР – блок принятия решений; ИС – виды измерительных ситуаций; БРТИ – блок, реализующий теплофизические измерения; ИО – исследуемые объекты; (ПО)₁... (ПО)_n – сведения о предметных областях, *n* – количество предметных областей; *S*_{МИ} – данные о методах измерений ТФС исследуемых объектов; *S*_{ДФ} – сведения о виде дестабилизирующего фактора (ДФ); *S*_М – данные об объекте исследования; *S*_Э – информация экспертов; *S*_П – данные пользователей; *V*_{ОИ} – процессы обменов информационными данными; *V*_{ИСр} – измерительная среда на основе базы знаний; *V*_{ПР} – формирование принятия решения с использованием БЗ; *V*_{ИС} – формирование информационных данных для персонального компьютера об измерительных ситуациях; *P*_{ТФС} – параметры ТФС материалов; *V*_{ТИО} – данные о значениях температур ИО; *V*_Н – значения мощностей тепловых воздействий на исследуемые материалы; *V*_{ТВ} – информационные данные о нагреве материалов; *V*_{АИ} – виды априорной информации

При проведении теплофизических измерений материалов блок принятия решения выполняет функции идентификации и выбора измерительных ситуаций для соответствующих диапазонов теплопроводности объектов исследования. На основе данных информационной модели интеллектуальной системы в зависимости от предметных областей исследований персональный компьютер реализует применяемый метод определения теплофизических свойств объектов и обрабатывает поступающую измерительную информацию с исследуемого материала с использованием априорных данных БЗ. Созданное информационное поле позволяет сформировать требования к объекту прогнозирования надежности – ИИИС ТФС исследуемых материалов (ИМ).

Информационная модель ИИИС $M_{инфИИИС}$ представлена в виде кортежа множеств:

$$M_{инфИИИС} = \langle T_{ИМ}, U_{П}, V_{ДФ}, X_{вхДФ}, Y_{выхДФ}, J_{ИП}, J_{ИЭ}, J_{БЗ}, J_{БПР}, S_{ИИИС}, K_{ИИИС} \rangle,$$

где приведены множества: $T_{ИМ} = \{T_{ИМ_i}, i = 1, \dots, N\}$ – выходные сигналы датчиков ИМ; $U_{П} = \{U_i, i = 1, \dots, m\}$ – определяемые параметры ТФС; $V_{ДФ} = \{V_{ДФ_i}, i = 1, \dots, n\}$ – дестабилизирующие факторы; $X_{вхДФ} = \{X_{вхДФ_i}, i = 1, \dots, x\}$ – входные сигналы при влиянии ДФ; $Y_{выхДФ} = \{Y_{выхДФ_i}, i = 1, \dots, y\}$ – выходные сигналы с учетом ДФ; $J_{ИП} = \{J_{ИП_i}, i = 1, \dots, l\}$ – информация, представленная пользователем; $J_{ИЭ} = \{J_{ИЭ_i}, i = 1, \dots, h\}$ – информация, данная экспертом; $J_{БЗ} = \{J_{БЗ_i}, i = 1, \dots, k\}$ – информация,

представленная в БЗ; $\mathbf{J}_{\text{БПР}} = \{J_{\text{БПР}i}, i = 1, \dots, r\}$ – информация, формируемая БПР; $\mathbf{S}_{\text{ИИИС}} = \{S_{\text{ИИИС}i}, i = 1, \dots, j\}$ – виды структур интеллектуальных информационно-измерительных систем; $\mathbf{K}_{\text{ИИИС}} = \{\Pi_{\text{Т}}, \Pi_{\text{оп}}, \delta\}$ – критерии, позволяющие оценить надежность ИИИС ТФС материалов ($\Pi_{\text{Т}}$ – потери точности, $\Pi_{\text{оп}}$ – потери оперативности, δ – погрешность измерения).

Информационная среда ИИИС включает созданную базу знаний на основе фреймовой модели представления знаний (рис. 2). База знаний создана с использованием фреймов, применяющихся для реализации интеллектуального алгоритма функционирования ИИИС ТФС материалов. Фреймовая модель базы знаний создана в нотации *UML* на платформе для моделирования *StarUML*. База знаний содержит априорную информацию, которая используется в процессе функционирования измерительной системы. Информационное обеспечение ИИИС позволяет получить, обрабатывать, анализировать, хранить, а также извлекать необходимую измерительную информацию о теплофизических свойствах материалов.

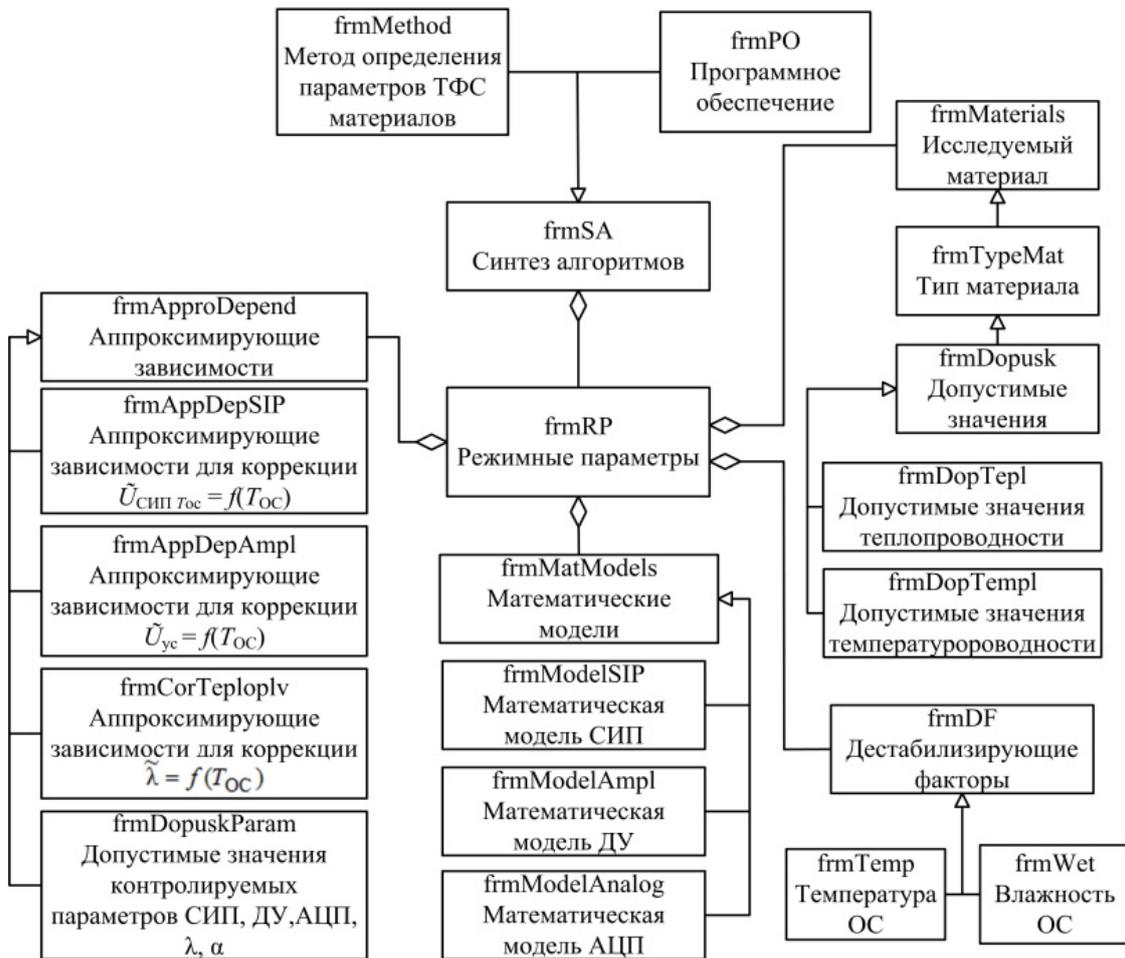


Рис. 2. Фреймовая модель знаний ИИИС ТФС материалов: СИП – система измерительных преобразователей; ДУ – дифференциальные усилители; АЦП – аналого-цифровые преобразователи; $\tilde{U}_{\text{СИП}}$ – сигнал на выходе СИП; $\tilde{U}_{\text{УС}}$ – сигнал на выходе усилителя; $T_{\text{ОС}}$ – температура окружающей среды

Информационная модель и фреймовая модель представления знаний служат основой для разработки ИИИС ТФС исследуемых объектов (рис. 3) [3–5].

ИИИС ТФС материалов выполнена на базе микроконтроллера *PIC18F8720*, который имеет большой объем памяти, высокое быстродействие, многоканальный параллельный информационный ввод-вывод. Функции микроконтроллера: обработка измерительной информации с термопар; управление выбором режимов работы системы и нагревом ИМ при проведении теплофизических измерений; осуществление контроля измерительной информации с выходов термопар, усилителей и АЦП и их погрешностей измерений; реализация интеллектуального алгоритма коррекции измерительной

информации структурных компонентов с использованием полученных аппроксимирующих зависимостей и проверки их соответствия заданному допуску, а также применение интеллектуального алгоритма прогнозирования надежности ИИИС. В базе знаний ИИИС ТФС исследуемых объектов хранится информация об алгоритмах функционирования системы; методах контроля коэффициентов λ и α исследуемых объектов, принятия решений при реализации интеллектуальных алгоритмов функционирования и прогнозирования надежности ИИИС. Согласно изменяющимся условиям функционирования ИИИС, информационной среды в системе применяется адаптивный интеллектуальный алгоритм, выполняющий процедуры коррекции результатов измерений компонентов измерительного канала с использованием информационной и математической моделей для прогнозирования надежности системы с учетом текущей и априорной информации об объектах исследования, представленных в базе знаний ИИИС. Алгоритмическое обеспечение ИИИС ТФС материалов реализовано с использованием разработанного программного обеспечения на основе языка программирования C++ и компилятора CCS PCWH. Повышение надежности ИИИС осуществляется методом самоконтроля системы на основе допускового контроля выходной информации компонентов измерительного канала с использованием программного обеспечения [6, 7].

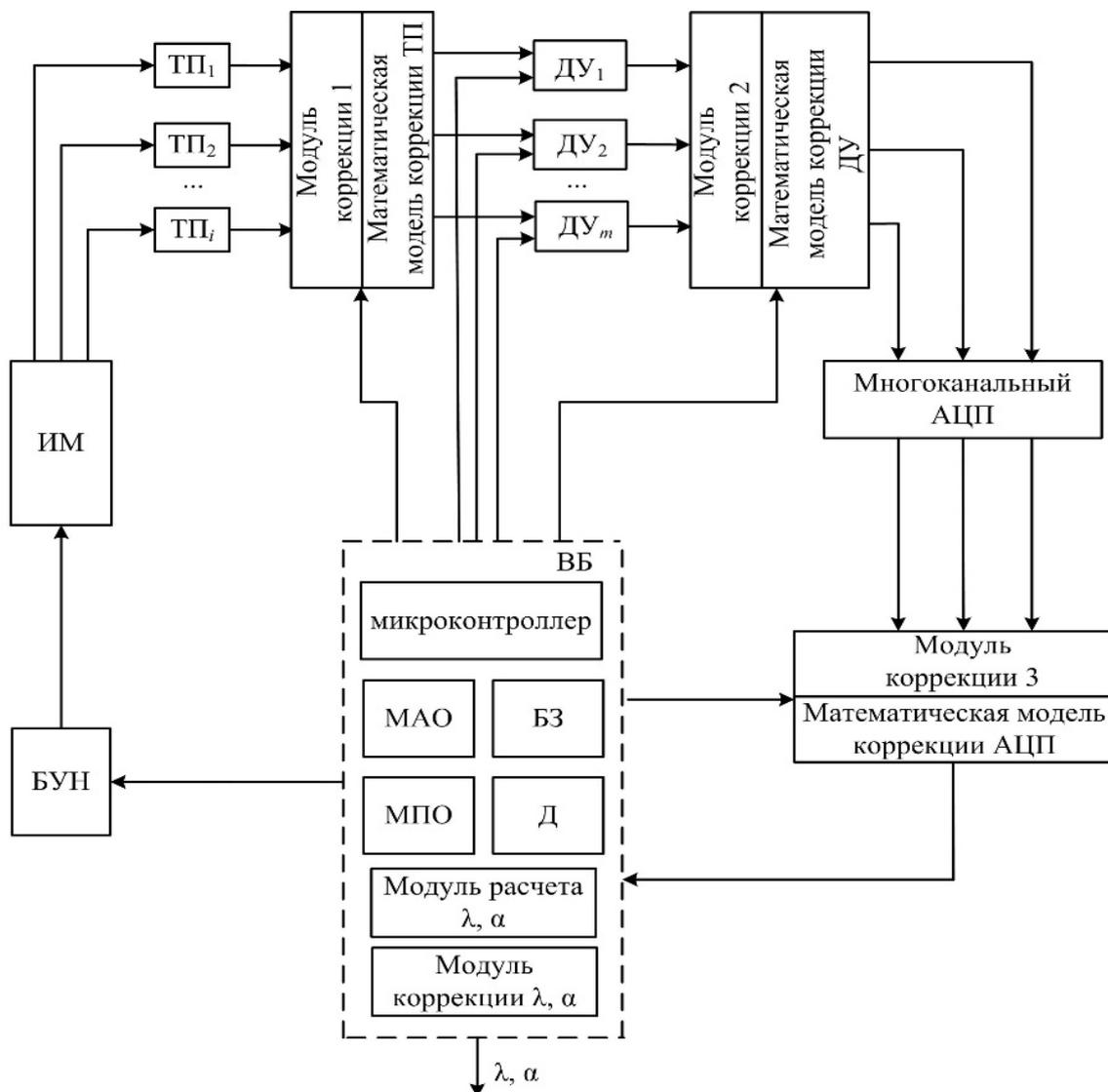


Рис. 3. Структурная схема ИИИС для определения теплофизических свойств материалов и прогнозирования надежности системы: ТП₁, ТП₂, ..., ТП_{*i*} – система термопар, размещенная в контактной области ИМ и измерительного зонда; *i* – число термопар; ДУ₁, ДУ₂, ..., ДУ_{*m*} – дифференциальные усилители; *m* – количество усилителей; ВБ – вычислительный блок, включающий: МК – микроконтроллер; MAO – модуль алгоритмического обеспечения; MPO – модуль программного обеспечения; модули коррекции результатов измерения; модули расчета и коррекции λ и α ; Д – дисплей; БУН – блок управления нагревом ИМ

Экспериментальные исследования ИИИС позволили получить зависимости коэффициентов теплопроводности λ и температуропроводности α теплоизоляционных, строительных и других материалов от температуры $\lambda = f(T)$, влажности $\lambda = f(W)$ и их аппроксимирующие функции $\tilde{\lambda} = f(T)$, $\tilde{\lambda} = f(W)$, хранящиеся в базе знаний ИИИС. Пример зависимостей для минеральной ваты приведен на рис. 4.

Аппроксимирующие зависимости $\tilde{\lambda} = f(T)$, $\tilde{\lambda} = f(W)$ имеют следующий вид:

$$\tilde{\lambda} = f(T) = -3,310 \cdot 10^{-8} T^3 + 1,843 \cdot 10^{-7} T^2 + 2,64 \cdot 10^{-4} T + 0,039 ;$$

$$\tilde{\lambda} = f(W) = 2,86 \cdot 10^{-7} W^3 - 4,27 \cdot 10^{-5} W^2 + 0,0019W + 0,048 .$$

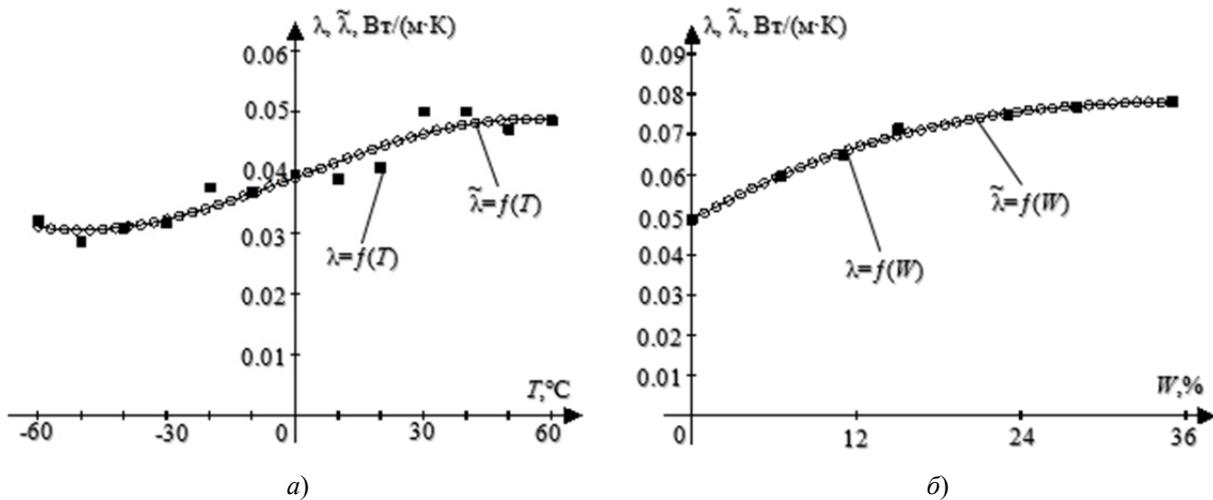


Рис. 4. Зависимости результатов измерения теплопроводности минеральной ваты от температуры $\lambda = f(T)$:
 а – влажности $\lambda = f(W)$; б – аппроксимирующие функции $\tilde{\lambda} = f(T)$, $\tilde{\lambda} = f(W)$

Если λ и α не соответствуют области допуска, то выполняется их коррекция с использованием аппроксимирующих зависимостей, хранящихся в БЗ ИИИС.

Постановка задачи прогнозирования надежности ИИИС ТФС материалов. При аналитическом прогнозировании измерительные сигналы компонентов измерительного канала $P_{\tau_i} = (p_1, p_2, \dots, p_i)$, контролируемые в интервалы времени $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_i$, необходимо определить в последующие временные интервалы τ_{i+1} . Решение задачи прогнозирования надежности ИИИС аналитическим методом сводится к формированию массива измерительной информации прогнозируемых параметров P_{τ_i} , анализу данных, получению аппроксимирующей функции, по которой определяется прогнозируемая величина параметра P_{τ_i} [8–10].

Математическая модель прогнозирования изменения теплофизических свойств исследуемых материалов представлена в виде следующей аналитической зависимости:

$$P_{Q_{n+1}} = AP_{Q_n} f(\rho, W, T) + \delta_{P_{Q_n}} ,$$

где $P_{Q_{n+1}}$ – прогнозируемые параметры материалов; A – коэффициент коррекции параметров теплоизоляционных материалов; P_{Q_n} – параметры объектов при исследовании; $\delta_{P_{Q_n}}$ – погрешность определения ТФС объектов; ρ – плотность материалов.

Модель прогнозирования свойств материалов позволяет определить направления изменения теплофизических свойств материалов при установлении качества теплозащитных покрытий объектов.

Разработана графовая математическая модель прогнозирования ТФС материалов (рис. 5).

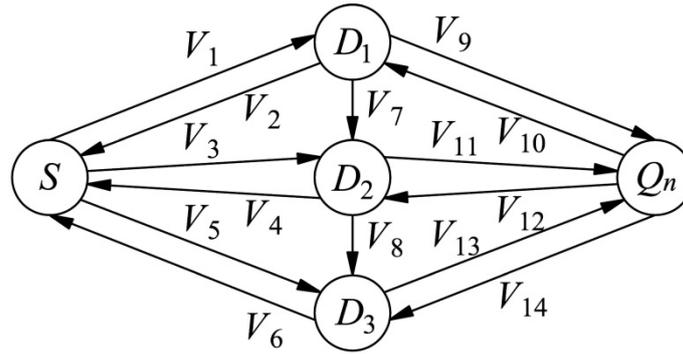


Рис. 5. Графовая математическая модель прогнозирования состояния теплозащитного покрытия объектов: S – ИИИС ТФС материалов; D_1, D_2, D_3 – датчики плотности покрытия объекта (ρ), влажности (W) и температуры (T) соответственно; Q_n – покрытие объекта; n – вид материала покрытия; $V_1 \dots V_{14}$ – информационные сигналы между вершинами графа

В соответствии с графовой моделью на рис. 5

$$V_i = \begin{cases} 0, & \text{если } D_1 \text{ подключается } Q_n, \\ 1, & \text{если } D_2 \text{ подключается } Q_n, \\ 01, & \text{если } D_3 \text{ подключается } Q_n. \end{cases}$$

Таким образом,

$$\begin{aligned} V_1 + V_2 + V_7 + V_8 + V_9 + V_{10} &= 0, \\ V_1 + V_3 + V_4 + V_7 + V_8 + V_{11} + V_{12} &= 1, \\ V_1 + V_5 + V_6 + V_7 + V_8 + V_{13} + V_{14} &= 01. \end{aligned}$$

При прогнозировании состояния теплозащитных покрытий объектов применяется метод экстраполяции при оценке будущих состояний качества покрытий на основе результатов исследований качественных показателей и статистической связи параметров покрытия объекта в настоящем и прошлом.

Прогнозирование погрешности при определении λ осуществляется с использованием полученных экспериментальным путем аппроксимирующих зависимостей относительной погрешности λ от погрешностей структурных элементов в измерительном канале системы:

$$\begin{aligned} \delta_{\lambda_{\text{ТП}}} &= f(\delta_{\text{ТП}}) = 0,0472(\delta_{\text{ТП}})^2 + 0,7659(\delta_{\text{ТП}}) + 8,0167, \\ \delta_{\lambda_{\text{ДУ}}} &= f(\delta_{\text{ДУ}}) = 0,0388(\delta_{\text{ДУ}})^2 + 0,8795(\delta_{\text{ДУ}}) + 6,9383, \\ \delta_{\lambda_{\text{АЦП}}} &= f(\delta_{\text{АЦП}}) = -0,1149(\delta_{\text{АЦП}})^2 + 1,8623(\delta_{\text{АЦП}}) - 0,4825. \end{aligned}$$

Результаты и обсуждение

Разработана информационная модель ИИИС ТФС материалов, отличающаяся наличием созданной базы знаний, содержащей информацию о параметрах разработанных математических моделей, методах определения ТФС материалов и аппроксимирующих зависимостях теплопроводности и температуропроводности материалов от температуры и влажности среды.

Математические модели прогнозирования используются для определения направления изменений контролируемых параметров ТФС исследуемых материалов с целью повышения качества выпускаемой продукции на предприятии.

Рекомендуется применение ИИИС с предложенным математическим и алгоритмическим обеспечением для контроля теплофизических свойств теплозащитных покрытий объектов, непрерывного или периодического мониторинга, анализа и прогнозирования уровня качества теплоизоляционных материалов.

Заключение

Информационное обеспечение использовано при разработке ИИИС ТФС материалов для реализации расчетно-аналитических функций и использования априорных данных для точного определения ТФС материалов и повышения качества изготавливаемых материалов на производстве.

Разработана структурная схема ИИИС теплофизических свойств исследуемых объектов, включающая разработанную информационную модель, базу знаний, реализующая предложенные математические модели прогнозирования надежности системы, интеллектуальные алгоритмы коррекции результатов измерений коэффициентов тепло- и теплопроводности, что позволяет повысить точность контроля теплофизических свойств материалов.

Математическое и информационное моделирование, тестовый самоконтроль структурных компонентов измерительного канала ИИИС на основе программного метода, алгоритмов коррекции технического несовершенства измерительной системы для повышения вероятности безотказной работы ИИИС обеспечило повышение надежности ИИИС ТФС материалов, что способствует повышению качества выпускаемой продукции на предприятии, сохранению необходимой теплоизоляции и увеличению срока эксплуатации теплозащитных покрытий исследуемых объектов.

Список литературы

1. Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н. Интеллектуальные информационные системы и методы искусственного интеллекта. М. : ИНФРА-М, 2021. 530 с.
2. Selivanova Z. M., Kurenkov D. S., Hoang T. A. Modelling of intelligent information measuring system to control thermophysical properties of materials and products // *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1278. P. 012040. doi:10.1088/1742-6596/1278/1/012040
3. Селиванова З. М., Куренков Д. С. Интеллектуальная информационно-измерительная система дистанционного контроля качественных параметров теплоизоляционных материалов в условиях воздействия дестабилизирующих факторов // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2020. Т. 26, № 1. С. 6–19. doi:10.17277/vestnik.2020.01.pp.006-019
4. Селиванова З. М., Куренков Д. С., Калинин В. Ф., Пасечников И. И. Повышение оперативности контроля теплофизических свойств теплоизоляционных материалов интеллектуальной информационно-измерительной системой // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2018. Т. 24, № 3. С. 424–436. doi:10.17277/vestnik.2018.03.pp.424-436
5. Selivanova Z. M., Khoan T. A. A Systematic Method of Improving the Accuracy of an Information and Measuring System for Determining the Thermophysical Properties of Materials Under the Effect of Destabilizing Factors // *Measurement Techniques*. 2017. Vol. 60. P. 473–480. doi:10.1007/s11018-017-1220-5
6. Selivanova Z. M., Kurenkov D. S., Varepo L. G., Trapeznikova O. V. Intelligent system functioning for thermophysical measurements in an uncertain measuring situation // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1791. P. 012110. doi:10.1088/1742-6596/1791/1/012110
7. Селиванова З. М., Скоморохов К. В. Идентификация измерительной ситуации при неопределенности теплофизических измерений // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. 2021. Т. 27, № 4. С. 516–527. doi:10.17277/vestnik.2021.04
8. Селиванова З. М., Хоан Т. А. Оценка надежности информационно-измерительной системы теплофизических свойств материалов при воздействии дестабилизирующих факторов // *Надежность и качество сложных систем*. 2016. № 4. С. 13–19. doi:10.21685/2307-4205-2016-4-2
9. Михайлов В. С., Юрков Н. К. Интегральные оценки в теории надежности. Введение и основные результаты : монография. М. : Техносфера, 2020. 152 с.
10. Викторова В. С., Степанянц А. С. Модели и методы расчета надежности технических систем. Изд. 2-е, испр. М. : Ленанд, 2016. 256 с.

References

1. Andreychikov A.V., Andreychikova O.N. *Intellektual'nye informatsionnye sistemy i metody iskusstvennogo intellekta = Intelligent information systems and methods of artificial intelligence*. Moscow: INFRA-M, 2021:530. (In Russ.)
2. Selivanova Z.M., Kurenkov D.S., Hoang T.A. Modelling of intelligent information measuring system to control thermophysical properties of materials and products. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;1278:012040. doi:10.1088/1742-6596/1278/1/012040
3. Selivanova Z.M., Kurenkov D.S. Intelligent information-measuring system for remote control of quality parameters of thermal insulation materials under the influence of de-stabilizing factors. *Vestnik Tambovskogo gosudar-*

- stvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tambov State Technical University*. 2020;26(1):6–19. (In Russ.). doi:10.17277/vestnik.2020.01.pp.006-019
4. Selivanova Z.M., Kurenkov D.S., Kalinin V.F., Pasechnikov I.I. Increasing the efficiency of control of thermophysical properties of thermal insulation materials by an intelligent information-measuring system. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tambov State Technical University*. 2018;24(3):424–436. (In Russ.). doi:10.17277/vestnik.2018.03.pp.424-436
 5. Selivanova Z.M., Khoan T.A. A Systematic Method of Improving the Accuracy of an Information and Measuring System for Determining the Thermophysical Properties of Materials Under the Effect of Destabilizing Factors. *Measurement Techniques*. 2017;60:473–480. doi:10.1007/s11018-017-1220-5
 6. Selivanova Z.M., Kurenkov D.S., Varepo L.G., Trapeznikova O.V. Intelligent system functioning for thermophysical measurements in an uncertain measuring situation. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1791:012110. doi:10.1088/1742-6596/1791/1/012110
 7. Selivanova Z.M., Skomorokhov K.V. Identification of the measuring situation with the uncertainty of thermophysical measurements. *Vestnik Tambovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tambov State Technical University*. 2021;27(4):516–527. (In Russ.). doi:10.17277/vestnik.2021.04
 8. Selivanova Z.M., Khoan T.A. Evaluation of the reliability of the information-measuring system of thermophysical properties of materials under the influence of destabilizing factors. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2016;(4):13–19. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2016-4-2
 9. Mikhaylov V.S., Yurkov N.K. *Integral'nye otsenki v teorii nadezhnosti. Vvedenie i osnovnye rezul'taty: monografiya = Integral estimates in the theory of reliability. Introduction and main results : monograph*. Moscow: Tekhnosfera, 2020:152. (In Russ.)
 10. Viktorova V.S., Stepanyants A.S. *Modeli i metody rascheta nadezhnosti tekhnicheskikh sistem = Models and methods for calculating the reliability of technical systems*. 2nd ed. rev. Moscow: Lenand, 2016:256. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Зоя Михайловна Селиванова

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры конструирования
радиоэлектронных и микропроцессорных систем,
Тамбовский государственный
технический университет
(Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106)
E-mail: selivanova_zm@mail.ru

Zoya M. Selivanova

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of design
of radio-electronic and microprocessor systems,
Tambov State Technical University
(106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

Кирилл Викторович Скоморохов

аспирант,
Тамбовский государственный
технический университет
(Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106)
E-mail: kirillv6812@gmail.com

Kirill V. Skomorokhov

Postgraduate student,
Tambov State Technical University
(106 Sovetskaya street, Tambov, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 15.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 10.01.2022

Принята к публикации/Accepted 15.02.2022

КЛАССИФИКАЦИИ НАНОМАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ТРАДИЦИОННЫХ И АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМЕ ТРАНСПОРТНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

В. П. Перевертов¹, Н. А. Кузин², Н. К. Юрков³

¹ Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, Россия

² Московский автомобильный институт (технический университет), Москва, Россия

³ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹vperevertov@yandex.ru, ²sputnik1985nk3y@mail.ru, ³yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Системный подход применяется к анализу эволюции развития технологий и создания умных производственных систем. *Материалы и методы.* Показано, что аддитивные технологии – это технологии 3D (4D)-печати изделий с помощью послойного лазерного (плазменного, ионного и т.д.) сплавления и/или спекания порошковых материалов, в том числе и наноматериалов. Предложена классификация порошковых наноматериалов, предназначенных как для традиционных, так и для аддитивных технологий формообразования деталей с составными элементами. Показано, что для эффективного производства изделий с помощью 3D- и 4D-печати (технологий) необходима система диагностического управления концентрированными потоками энергии технологического оборудования. Альтернативой традиционным подходам являются «умные» производства, ранее называемые гибкими производственными системами. *Результаты и выводы.* Оценивается возможность использования «умных» производств в решении проблем создания производственной инфраструктуры ОАО «РЖД», предназначенной для мелкосерийного производства/ремонта подвижного состава.

Ключевые слова: качество, контроль, датчики, технологии традиционные и аддитивные (3D-печать), наноматериалы и «умные» материалы

Для цитирования: Перевертов В. П., Кузин Н. А., Юрков Н. К. Классификации наноматериалов для традиционных и аддитивных технологий в системе транспортного машиностроения // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 70–77. doi:10.21685/2307-4205-2022-2-8

CLASSIFICATIONS OF NANOMATERIALS FOR TRADITIONAL AND ADDITIVE TECHNOLOGIES IN THE SYSTEM OF TRANSPORT ENGINEERING

V.P. Perevertov¹, N.A. Kuzin², N.K. Yurkov³

¹ Samara State University of Railway Transport, Samara, Russia

² Moscow Road Institute (Technical University), Moscow, Russia

³ Penza State University, Penza, Russia

¹vperevertov@yandex.ru, ²sputnik1985nk3y@mail.ru, ³yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* The systems approach is applied to the analysis of the evolution of technology development and the creation of smart production systems. *Materials and methods.* It is shown that additive technologies are technologies for 3D (4D) printing of products using layer-by-layer laser (plasma, ion, etc.) fusion and/or sintering of powder materials, including nanomaterials. A classification of powder nanomaterials is proposed for both traditional and additive technologies for shaping parts with constituent elements. It is shown that for the efficient production of products using 3D and 4D printing (technologies), a system of diagnostic control of concentrated energy flows of technological equipment is needed. An alternative to traditional approaches is "smart" production, previously called flexible production systems. *Results and conclusions.* The possibility of using "smart" industries in solving the problems of creating the production infrastructure of Russian Railways for small-scale production/repair of rolling stock is assessed.

Keywords: quality, control, sensors, traditional and additive technologies (3-D printing), nanomaterials and smart materials

For citation: Perevertov V.P., Kuzin N.A., Yurkov N.K. Classifications of nanomaterials for traditional and additive technologies in the system of transport engineering. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(2):70–77. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-2-8

Аддитивные технологии (АТ) – это технологии АМ (АФ) или 3D (4D)-печать послойного лазерного (плазменного, ионного и т.д.) сплавления – спекания порошковых материалов, включая композиционные и нанокристаллические материалы, позволяющие в автоматизированном цифровом режиме строить трехмерные изделия по компьютерной модели, сокращающие время и затраты на получение изделия, устраняющие дефекты, приводящие к отказам и уменьшающие трудоемкость обработки материалов, называют «технологией 5-го промышленного уровня» [1–6].

Для эффективного производства изделий с помощью 3D- и 4D-печати (технологий) необходима система диагностического управления концентрированными потоками энергии технологического оборудования, оснащенная быстродействующими бесконтактными датчиками (сенсорами) и исполнительными органами – основных элементов УПС [4–7]. Анализ работ по изучению АТ послойного синтеза металлических, полимерных, металлокерамических и нанопорошковых композиций формообразования деталей (заготовок) показал тренд исследований: внедрение в промышленность высокопроизводительных лазерных и плазменных, ионных энергетических технологических систем для спекания и сплавления металлопорошковых композиций, оснащенных бесконтактными, быстродействующими датчиками, основы систем контроля, диагностики и адаптивного (интеллектуального) управления альтернативными (гибридными) технологиями, обеспечивающих надежность оборудования и качество продукции (деталей, узлов, агрегатов) в условиях УПС [4–9].

Общим требованием к порошковым материалам для технологий АМ (АФ)-машин является **сферическая форма частиц**, обеспечивающая компактную укладку частиц порошка в определенный объем, а также «текучесть» порошковой композиции с минимальным сопротивлением в системах подачи порошкового материала. **Методы получения порошковых материалов** разделяют на **физико-химические** и **механические**. К **физико-химическим** относят методы, связанные с физико-химическими превращениями исходного сырья, при этом химический состав и структура конечного продукта – порошковый материал – существенно отличается от исходного материала. **Механические методы** обеспечивают производство порошкового материала из сырья без изменения химического состава с помощью размол в **мельницах**, а также **диспергирование (атомизация)** процесса. Частицы порошков, получаемых путем размол, имеют неправильную форму и содержат примеси и продукты износа и применяют в традиционных технологиях формообразования деталей.

Порошковые материалы (порошки) – сыпучие материалы с размером частиц до 1,0 мм – классифицируют по **размерам частиц** (диаметр d):

- 1) **нанодисперсные** : $d < 0,001$ мкм;
- 2) **ультрадисперсные**: $d = 0,01–0,1$ мкм;
- 3) **высокодисперсные**: $d = 0,1–10$ мкм;
- 4) **мелкие**: $d = 10–40$ мкм;
- 5) **средние**: $d = 40–250$ мкм;
- 6) **крупные**: $d = 250–1000$ мкм [8].

В аддитивных FM (АМ) технологических машинах используются порошки различного фракционного состава с определенным перечнем материалов. Отсутствие стандартов на порошковые материалы для АТ и методов оценки качества (контроль и диагностика) свойств материалов, затрудняет их применение из-за **анизотропии**, возникающей при послойном принципе создания детали.

Одним из трендов развития машиностроения и материаловедения является **разработка** новых порошковых **наноматериалов** и гибких технологий их **получения** и **обработки** [1–7, 10, 11], создания на их основе программируемых материалов и композитов.

К **наноматериалам** относят дисперсные и объемные (массивные) материалы, содержащие структурные элементы (зерна, кристаллиты, блоки, кластеры), геометрические размеры которых не превышают 100 нм, и обладающие новыми свойствами, наличие которых обеспечивает появление качественно новых механических, химических, физических свойств, определяемых проявлением наномасштабных факторов [1–7, 10–14], функциональных и эксплуатационных характеристик. **Любые преобразования вещества на нанометровом уровне** составляют **нанотехнологии**, обеспечивающие возможность путем контроля создавать наноматериалы, а также осуществлять их интеграцию в надежно функционирующие сложные, управляемые динамические системы [2, 4–7, 9]. В отличие от традиционной технологии для нанотехнологии характерен «индивидуальный» подход, при котором внешнее управление достигает отдельных атомов и молекул, что позволяет создавать из них «бездефектные» материалы с принципиально новыми физико-химическими и биологически-

ми свойствами, новые классы устройств с характерными нанометровыми размерами. Анализ АТ позволяет выделить в ней ряд важнейших направлений:

- 1) **молекулярный дизайн**;
- 2) **материаловедение** (создание «бездефектных» высокопрочных материалов);
- 3) **приборостроение** (создание сканирующих туннельных микроскопов, атомно-силовых и магнитных микроскопов, миниатюрных сверхчувствительных датчиков, нанороботов и т.д.);
- 4) **электроника** (конструирование нанометровой элементной базы для ЭВМ – нанопроводов, транзисторов, выпрямителей, дисплеев и т.д.);
- 5) **оптика** (создание и синтез систем с нанолазерами);
- 6) **гетерогенный катализ**;
- 7) **медицина**;
- 8) **трибология** (определение связи наноструктуры материалов и сил трения для изготовления пар трения);
- 9) **управляемые ядерные реакции**.

Классификация наноматериалов для сложных систем представляет собой совокупность классификации наноматериалов 1 рода (по основным категориям) и классификации 2 рода (структура наноматериалов по кристаллитам).

Классификация наноматериалов 1 рода по основным категориям:

1 категория – материалы твердых тел, размеры которых в трех координатах не превышают 100 нм. К ним относятся наноразмерные частицы (нанопорошки), нанопроволоки и нановолокна, пленки толщиной менее 100 нм, которые могут содержать от одного структурного элемента или кристаллита (для частиц порошка) до нескольких их слоев (для пленки), т.е можно классифицировать как наноматериалы с малым числом структурных элементов или наноматериалы в виде наноизделий.

2 категория – материалы в виде изделий с размером 1 мкм...1 мм (проволоки, фольга) и их можно классифицировать как наноматериалы с большим числом структурных элементов (кристаллитов), или **наноматериалы в виде микроизделий**;

3 категория – объемные наноматериалы с размерами изделий из них в макродиапазоне (мм), состоящие из большого числа наноразмерных элементов (кристаллитов) и являющихся поликристаллическими материалами с размером зерна 1...100 нм, которые условно можно разделить на две группы. В **группу 3.1** входят однофазные материалы, структура и химический состав которых изменяется по объему материала только на атомном уровне [3–8] и которые находятся в неравновесном состоянии (в состоянии стекла). К **группе 3.2** относятся микроструктурно неоднородные материалы, состоящие из наноразмерных элементов (кристаллитов, блоков) с различной структурой и составом на основе сложных металлических сплавов. **Вторая и третья категории** наноматериалов являются **нанокристаллическими** или **нанофазными материалами** [10].

К **четвертой категории** относятся порошковые композиционные материалы (КМ), содержащие в своем составе компоненты из наноматериалов, отнесенные к **первой категории** (композиты с наночастицами и/или нановолокнами, изделия с измененным ионной имплантацией поверхностным слоем или тонкой пленкой) и **второй категории** (композиты, упрочненные волокнами и/или частицами с наноструктурой, материалы с модифицированным наноструктурным поверхностным слоем или покрытием), а также КМ со сложным использованием нанокомпонентов. **Классификация наноматериалов 2 рода по кристаллитам** содержит свойства (признаки), которые определяются характером распределения, формой и химическим составом кристаллитов (наноразмерных элементов), из которых они состоят (табл. 1).

По **форме кристаллитов** наноматериалы можно разделить на:

- 1) слоистые (пластинчатые);
- 2) волокнистые (столбчатые);
- 3) равноосные [3, 10–13].

Толщина слоя, диаметр волокна и размер зерна составляет порядка < 100 нм.

По **химическому составу** кристаллитов и их границ наноматериалы можно классифицировать на четыре группы [1–3, 10–13]:

- 1) наноматериалы, у которых химический состав кристаллитов и границ раздела одинаков (однофазные): чистые металлы с нанокристаллической равноосной структурой и слоистые поликристаллические полимеры;
- 2) материалы, у которых химический состав кристаллитов различен, но границы являются идентичными по химическому составу;

- 3) наноматериалы, у которых как кристаллиты, так и границы имеют различный химический состав;
- 4) наноматериалы, в которых наноразмерные частицы, волокна, слои распределены в матрице, имеющей другой химический состав.

Основные методы получения нанокристаллических материалов для АТ представлены на рис. 1.

Таблица 1

Основные типы структуры наноматериалов [1–3, 5, 6, 11]

Характер распределения	кристаллитное			матричное
	состав кристаллитов и границ одинаковый	состав кристаллитов различен при одинаковом составе границ	состав и кристаллитов и границ различный	
Химический состав				кристаллиты распределены в матрице другого состава
Форма кристаллитов:				
Слоистая				
Волокнистая				
Равноосная				

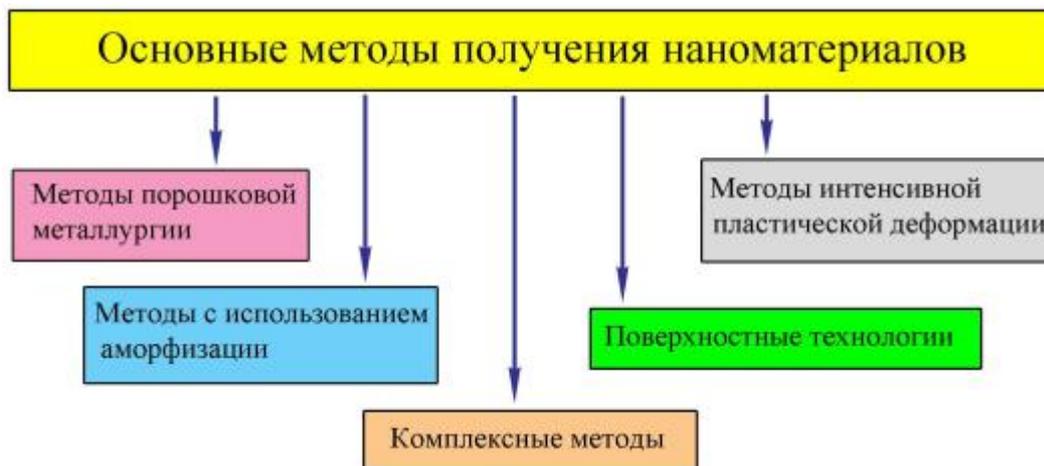


Рис. 1. Основные методы получения наноматериалов

Методы порошковой металлургии позволяют получить порошковые материалы с управляемыми характеристиками: механическими, магнитными, технологическими и др., а изделия из них используются в транспортном машиностроении:

- 1) механическое измельчение металлов в вихревых, вибрационных и шаровых мельницах и т.д.;
- 2) распыление расплавов жидких металлов в среде инертных газов для эффективного очищения расплава от многих примесей при высокой производительности и экономичности процесса;

- 3) электролитический метод;
- 4) специальные порошки, получаемые осаждением, науглероживанием, термической диссоциацией летучих соединений (карбонильный метод) и другими способами [4–9].

Методы с использованием аморфизации позволяют получать аморфные металлические сплавы, являющиеся новым перспективным материалом путем сверхбыстрого охлаждения материала из газообразного, жидкого или ионизированного состояния. Существуют методы получения аморфных сплавов [13]:

- 1) высокоскоростное ионно-плазменное и термическое напыление материала на охлаждаемую жидким азотом на подложку позволяет получать слои толщиной до 5 мм;
- 2) химическое или электролитическое осаждение ионов металлов на подложку;
- 3) оплавление тонких поверхностных слоев деталей лазерным лучом;
- 4) лазерная обработка смеси порошков при быстром отводе тепла от расплава;
- 5) закалка из жидкого состояния и т.д.

Методы позволяют получать аморфные сплавы [13] при производстве лент, фольг и проволок толщиной до 100 мкм и шириной до 200 мм. Возможность получения аморфного состояния определяется химическим составом и скоростью охлаждения [3, 13, 14]. Аморфное состояние сплавов является метастабильным, поэтому после аморфизации часто проводят отжиг, в процессе которого частично происходит переход к более стабильному нанокристаллическому состоянию аморфизирующихся сплавов. Для получения аморфного состояния проводят предварительную обработку (высокоскоростная закалка) заготовок: объемно-аморфизирующихся сплавов на основе железа, возможно получение нанокристаллической или аморфно-нанокристаллической структуры *непосредственно при закалке расплава* со скоростью охлаждения немного ниже критической скорости образования аморфного состояния [3, 7–14]. Для получения наноструктуры используется *контролируемая кристаллизация сплавов из аморфного состояния* при термообработке [14], получение нанокристаллической структуры путем *инициации процессов кристаллизации в процессе деформирования аморфного материала*.

Методы получения **наноструктурных материалов** (рис. 2) с использованием **интенсивной пластической деформации (ИПД)** относятся к обработке материалов давлением (**ОМД**) и основаны на пластической деформации с большими степенями деформации в условиях высоких давлений, когда происходит сильное измельчение микроструктуры в металлах и сплавах до наноразмерного диапазона [3, 10, 11]. *Методом ИПД кручения под высоким давлением* измельчается структура материала после деформации образца. Образование ультрамелкозернистой структуры с размером зерен 100–200 нм (рис. 2,а) определяется условиями деформации – давлением, температурой, скоростью деформации и видом обрабатываемого материала. *Метод равноканального углового прессования* (рис. 2,б), основанный на использовании деформации сдвигом, формирует ультрамелкозернистую структуру в диапазоне от 200 до 500 нм [10].

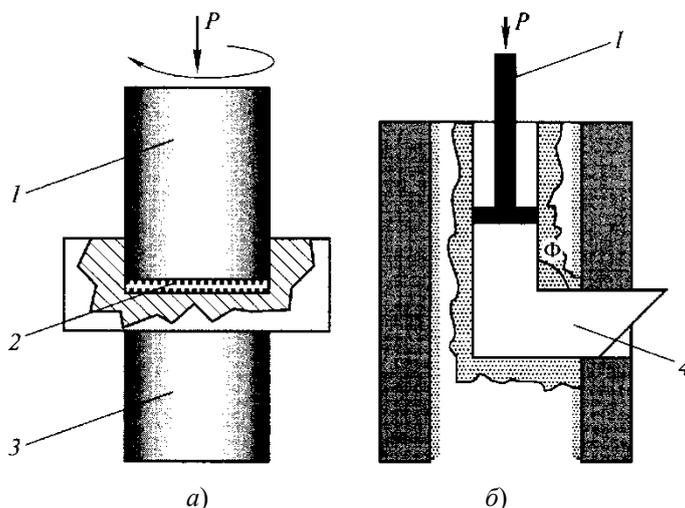


Рис. 2. Схема методов интенсивной пластической деформации (ИПД):
 а – метод кручения под высоким давлением; б – метод равноканального углового прессования; 1 – верхний пуансон; 2 – образец; 3 – нижний пуансон; 4 – заготовка

Разрабатываются методы ИПД на КШМ ударного действия (молоты, винтовые прессы) и специальная прокатка, которые должны отвечать требованиям:

- 1) формирования ультрамелкозернистых структур для качественного изменения свойств материалов;
- 2) обеспечения стабильности свойств наноматериала;
- 3) отсутствия механических повреждений и трещин.

Наноструктурные материалы содержат в структуре большое количество границ зерен, формирующих их необычные физические и механические свойства, высокую прочность и уникальную пластичность. Методы получения наноматериалов с использованием технологий обработки поверхности материалов путем создания на поверхности материалов модифицированных слоев рассматриваются как методы нанотехнологии, так как позволяют создавать наноразмерные и наноструктурные слои на поверхности материалов, композиционные материалы с наноконпонентами, а в ряде случаев и наноматериалы в виде нано- и микроизделий. Данные методы можно подразделить на две группы: технологии, основанные на физических и химических процессах. Среди наноориентированных технологий обработки поверхности перспективными являются ионно-вакуумные технологии нанесения покрытий. Полученные слои отличаются высокой адгезией, а температурное воздействие на материал основы минимальное. Размер кристаллитов в пленках, полученных по технологиям вакуумного нанесения, может достигать 1–3 нм [8, 14].

Комплексные методы получения наноматериалов используются последовательно (параллельно) в разных технологиях, рассмотренных ранее.

Синтез компьютерного моделирования и материаловедения позволил создавать программируемые умные материалы на основе наноматериалов, из которых изготавливаются изделия, способные к самоорганизации, изменяя при этом свои форму и свойства (функции) при воздействии энергии (световой, тепловой и т.д.), благодаря тому, что в них запрограммированы определенные свойства, реализуемые технологией четырехмерной (4D) печати. Технология 4D-принтер является подвидом аддитивных технологий (АТ) для создания самосборных технологических систем на основе программируемых наноматериалов и включает алгоритм 4D-печати:

- 1) 3D-принтер создает объект путем послойного распределения материала;
- 2) на выходе мы получаем изделие нужной конфигурации;
- 3) в этом особенность 4D-печати – напечатанные таким образом изделия (также создаются слой за слоем) могут через определенный промежуток времени менять свои форму и свойства под действием энергии;
- 4) изделия, изготовленные технологией 4D-принтером из программируемых материалов, могут собирать (выстраивать) себя сами, превращать одни изделия в другие или менять их свойства по мере надобности с помощью освоенных технологий – 3D-принтеров [4–6].

Разработка программируемых умных материалов на основе наноматериалов позволит создать роботизированные микроскопические системы с помощью 4D-печати, способных менять свою форму и функции. Если в процессе объединения технологии 4D-печати и наноматериалов в объект (изделие) внедрить «умные» материалы, то на выходе получатся многофункциональные наноконпози́ты, способные изменять свои свойства при воздействии на них электромагнитных волн (ультрафиолетовое излучение). В ходе эволюции таких материалов появится новый класс датчиков для встраивания в технические системы контроля и диагностики параметров микротехнологий. Технология 3D-принтера позволяет «вырастить» изделие, способное менять свои формы, функции и назначения. Для этого нужно «заложить» в управляющие программы аддитивного оборудования данные о свойствах программируемых материалов и о трансформациях, которые должны произойти с «выращенным» изделием.

Заключение

1. Анализ аддитивных технологии 3D (4D)-послойного синтеза металлических, металлокерамических и наноструктурированных порошковых композиций формообразования деталей показал тренд внедрения в промышленность высокопроизводительных лазерных, плазменных и ионно-плазменных технологических систем для спекания и сплавления металлопорошковых «умных» композиций, оснащенных системами контроля, диагностики и адаптивного (интеллектуального) управления технологиями, обеспечивающих надежность оборудования и качество продукции в условиях УПС.

2. Классификация наноматериалов является основой создания контролируемых технологий программируемых порошковых материалов, использование которых в технологиях 4D-печати позволит создавать самосборные технологические системы (датчики, роботы) в транспортных системах, имеющих специальные свойства: антифрикционные детали узлов трения приборов и машин, конструкционные и электротехнические детали для электронной и радиотехнической промышленности.

Список литературы

1. URL: <http://nanodigest.ru/stati/entciklopediia-nanotekhnologii>
2. URL: <http://www.museion.ru/prev.pdf>
3. Алымов М. И. Методы получения и физико-механические свойства объемных нанокристаллических материалов. М. : МИФИ, 2005. 52 с.
4. Перевертов В. П. Качество управления гибкими технологиями : монография. Самара : СамГУПС, 2019. 270 с.
5. Перевертов В. П. Материаловедение и гибкие технологии : учебник. Самара : СамГУПС, 2020. 230 с.
6. Перевертов В. П. Диагностика и управление кузнечными машинами в гибких производственных системах : монография. Самара : СамГУПС, 2021. 291 с.
7. Перевертов В. П., Андрончев И. К. Технологические возможности концентрированных потоков энергии для формообразования деталей машиностроения // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 1. С. 71–83.
8. Перевертов В. П., Юрков Н. К., Пиганов М. Н. Методика расчета быстродействующего исполнительного органа КШМ с системой диагностического управления // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 3. С. 40–49.
9. Перевертов В. П., Юрков Н. К., Андрончев И. К., Порошковые композиты и наноматериалы в гибких технологиях формообразования деталей машиностроения // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 2. С. 85–95.
10. Новые материалы / под ред. Ю. С. Карабасова. М. : МИСИС, 2002. 736 с.
11. Головин Ю. И. Введение в нанотехнологию. М. : Машиностроение, 2003. 112 с.
12. Алымов М. И. Механические свойства нанокристаллических материалов. М. : МИФИ, 2004. 32 с.
13. Конструкционные материалы / под ред. Б. Н. Арзамасова. М. : Машиностроение, 1990. 688 с.
14. Ковнеристый Ю. К. Объемно-аморфизирующиеся металлические сплавы и наноструктурные материалы на их основе // Металловедением и термическая обработка. 2005. № 5. С. 199–219.

References

1. Available at: <http://nanodigest.ru/stati/entciklopediia-nanotekhnologii>
2. Available at: <http://www.museion.ru/prev.pdf>
3. Alymov M. I. *Metody polucheniya i fiziko-mekhanicheskie svoystva ob'emnykh nanokristallicheskikh materialov = Methods of obtaining and physico-mechanical properties of bulk nanocrystalline materials*. Moscow: MIFI, 2005:52. (In Russ.)
4. Perevertov V.P. *Kachestvo upravleniya gibkimi tekhnologiyami: monografiya = Quality of management of flexible technologies : monograph*. Samara: SamGUPS, 2019:270. (In Russ.)
5. Perevertov V.P. *Materialovedenie i gibkie tekhnologii: uchebnik = Materials science and flexible technologies : textbook*. Samara: SamGUPS, 2020:230. (In Russ.)
6. Perevertov V.P. *Diagnostika i upravlenie kuznechnymi mashinami v gibkikh proizvodstvennykh sistemakh: monografiya = Diagnostics and control of forging machines in flexible production systems : monograph*. Samara: SamGUPS, 2021:291. (In Russ.)
7. Perevertov V.P., Andronchev I.K. Technological capabilities of concentrated energy flows for shaping machine-building parts. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(1):71–83. (In Russ.)
8. Perevertov V.P., Yurkov N.K., Piganov M.N. Methodology for calculating a high-speed executive body of a KSM with a diagnostic control system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2018;(3):40–49. (In Russ.)
9. Perevertov V.P., Yurkov N.K., Andronchev I.K. Powder composites and nanomaterials in flexible technologies of forming machine-building parts. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(2):85–95. (In Russ.)
10. Karabasov Yu.S. (ed.). *Novye materialy = New materials*. Moscow: MISIS, 2002:736. (In Russ.)
11. Golovin Yu.I. *Vvedenie v nanotekhnologiyu = Introduction to nanotechnology*. Moscow: Mashinostroenie, 2003:112. (In Russ.)

12. Alymov M.I. *Mekhanicheskie svoystva nanokristallicheskih materialov = Mechanical properties of nanocrystalline materials*. Moscow: MIFI, 2004:32. (In Russ.)
13. Arzamasov B.N. (ed.). *Konstruktsionnye materialy = Structural materials*. Moscow: Mashinostroenie, 1990:688. (In Russ.)
14. Kovneristy Yu.K. Volumetrically amorphizing metal alloys and nanostructured materials based on them. *Metallovedeniem i termicheskaya obrabotka = Metallovedenii i heat treatment*. 2005;(5):199–219. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Валерий Петрович Перевертов

кандидат технических наук, доцент,
профессор кафедры наземных
транспортно-технологических средств,
Самарский государственный университет
путей сообщения
(Россия, г. Самара, ул. Свободы, 2 В)
E-mail: vperevertov@yandex.ru

Николай Андреевич Кузин

студент,
Московский автодорожный институт
(технический университет)
(Россия, г. Москва, Ленинградский просп., 64)
E-mail: sputnik1985nk3y@mail.ru

Николай Кондратьевич Юрков

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

Valeriy P. Perevertov

Candidate of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department of ground
transportation and technology tools,
Samara State University of Railway Transport
(2 V Svobody street, Samara, Russia)

Nikolai A. Kuzin

Student,
Moscow Road Institute (Technical University)
(64 Leningradsky avenue, Moscow, Russia)

Nikolay K. Yurkov

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

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию / Received 29.05.2021

Поступила после рецензирования / Revised 30.06.2021

Принята к публикации / Accepted 14.09.2021

ДЕЛИТЕЛЬ НАПРЯЖЕНИЙ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЙ ДНВ-20И ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

А. С. Ильин¹, И. А. Карчев², А. П. Воронов³

¹ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
^{1,2,3} Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов, Пенза, Россия
¹ aalexeiil@mail.ru, ² npk4p@niiemp.ru, ³ npk@niiemp.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность применения делителей напряжений высоковольтных в информационно-измерительных системах определяется широким применением высоких напряжений в различных сферах человеческой деятельности. Контроль импульсов высоких напряжений вызывает необходимость применения широкополосных делителей напряжений. Целью работы является ознакомление с современным отечественным делителем напряжений высоковольтным ДНВ-20И и результатами его испытаний. *Материалы и методы.* Метод масштабного преобразования. *Результаты.* Приведено описание и результаты испытаний делителя напряжения ДНВ-20И. *Вывод.* Делитель напряжений высоковольтный ДНВ-20И соответствует заявленным данным и может использоваться для контроля и измерений цепей постоянного и переменного тока, а также импульсного напряжения.

Ключевые слова: высокое напряжение, импульсное напряжение, делитель напряжения, грозовой импульс, испытания

Для цитирования: Ильин А. С., Карчев И. А., Воронов А. П. Делитель напряжений высоковольтный ДНВ-20И для широкополосных информационно-измерительных систем // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 78–84. doi:10.21685/2307-4205-2022-2-9

HIGH VOLTAGE DIVIDER DNV-20I FOR BROADBAND INFORMATION-MEASURING SYSTEMS

A.S. Ilin¹, I.A. Karchev², A.P. Voronov³

¹ Penza State University, Penza, Russia
^{1,2,3} Scientific Research Institute of Electro-Mechanical Devices, Penza, Russia
¹ aalexeiil@mail.ru, ² npk4p@niiemp.ru, ³ npk@niiemp.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the use of high-voltage voltage dividers in information-measuring systems is determined by the wide use of high voltages in various fields of human activity. The control of high voltage pulses necessitates the use of broadband voltage dividers. The purpose of the work is to familiarize with the modern domestic high-voltage voltage divider DNV-20I and the results of its tests. *Materials and methods.* Scale transformation method. *Results.* The description and test results of the voltage divider DNV-20I are given. *Conclusion.* The high-voltage voltage divider DNV-20I corresponds to the declared data and can be used to control and measure DC and AC circuits, as well as impulse voltage.

Keywords: high voltage, impulse voltage, voltage divider, lightning impulse, tests

For citation: Ilin A.S., Karchev I.A., Voronov A.P. High voltage divider DNV-20I for broadband information-measuring systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(2):78–84. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-2-9

В настоящее время в информационно-измерительных системах (ИИС) электроэнергетического комплекса возрастает нужда в контроле и измерении импульсов высоких напряжений до 20 кВ. Сфера применения напряжений данного уровня не ограничивается только распределительными

подстанциями. Импульсные напряжения активно применяются в таких областях, как научные исследования, производство полупроводников, ионная имплантация, электростатика, контроль качества изоляции, электроэрозионная обработка материалов, импульсная рентгенография, термоядерные исследования и т.д.

Для обеспечения контроля и измерения в диапазоне частот до 5 МГц импульсов высоких напряжений в диапазоне до 20 кВ используются импульсные высоковольтные делители напряжений, масштабирующие входное напряжение [1].

Так, отечественный делитель напряжений высоковольтный импульсный ДНВ-20И предназначен для использования в качестве масштабного преобразователя высоких постоянных, переменных и импульсных (1,2/50 мкс) напряжений. Может использоваться для контроля режимов работы тиристорных и транзисторных компенсаторов реактивной мощности (до 50 Мвар) в энергетических установках, электротехнических и радиотехнических ИИС, промышленности, контроля качества изоляции, научных исследованиях [2].

Работа делителя напряжений заключается в свойствах пассивных линейных электрических цепей изменять амплитуду напряжения в любой точке электрической цепи пропорционально амплитуде входного сигнала [3].

Особенностью является возможность во всем диапазоне преобразовывать импульсы напряжения и работать в широкой полосе частот.

Делитель ДНВ-20И не уступает лучшим зарубежным аналогам – изделиям фирм HILO-Test (Германия), Ross Engineering Corp. (США), Haefely Test AG (Швейцария) [4].

Схема замещения ДНВ представлена в статье «Масштабные преобразователи высокого напряжения для информационно-измерительных систем», опубликованной в журнале «Надежность и качество сложных систем (2021)» [5].

Для проверки работоспособности делителя собрана схема модели в программе моделирования Multisim (рис. 1). На вход схемы подается напряжение V1 амплитудой 18 кВ. Блоки высокого НВ1 и низкого НВ2 напряжения образуют делитель с коэффициентом деления $K_d = 1500$, вследствие чего на выходе Out1 имеется напряжение 12 В.

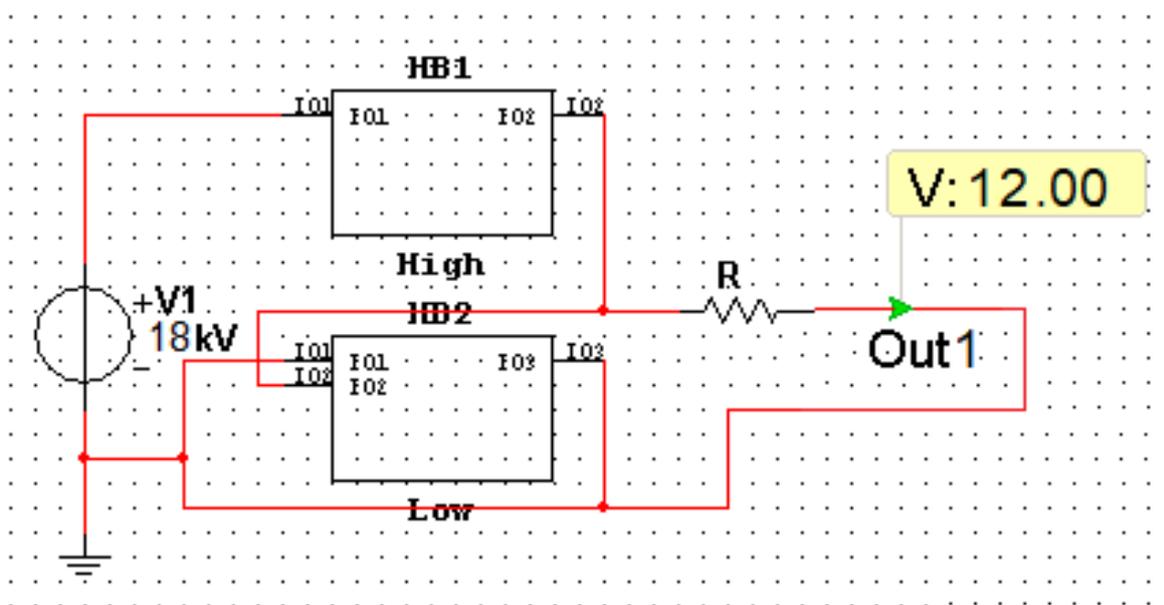


Рис. 1. Модель ДНВ-20И в программе Multisim

На готовом образце проверена работа с импульсами на низком уровне напряжения. В качестве источника выбран генератор импульсов Г5-54, с которого на вход ДНВ подавались прямоугольные импульсы амплитудой 6 В. На рис. 2 представлена осциллограмма входного С1 (желтый луч) и выходного С2 (синий луч) импульса.

Напряжение на выходе 4 мВ подтверждает, что делитель напряжений имеет соответствующий коэффициент деления и без искажений передает форму входного импульса.

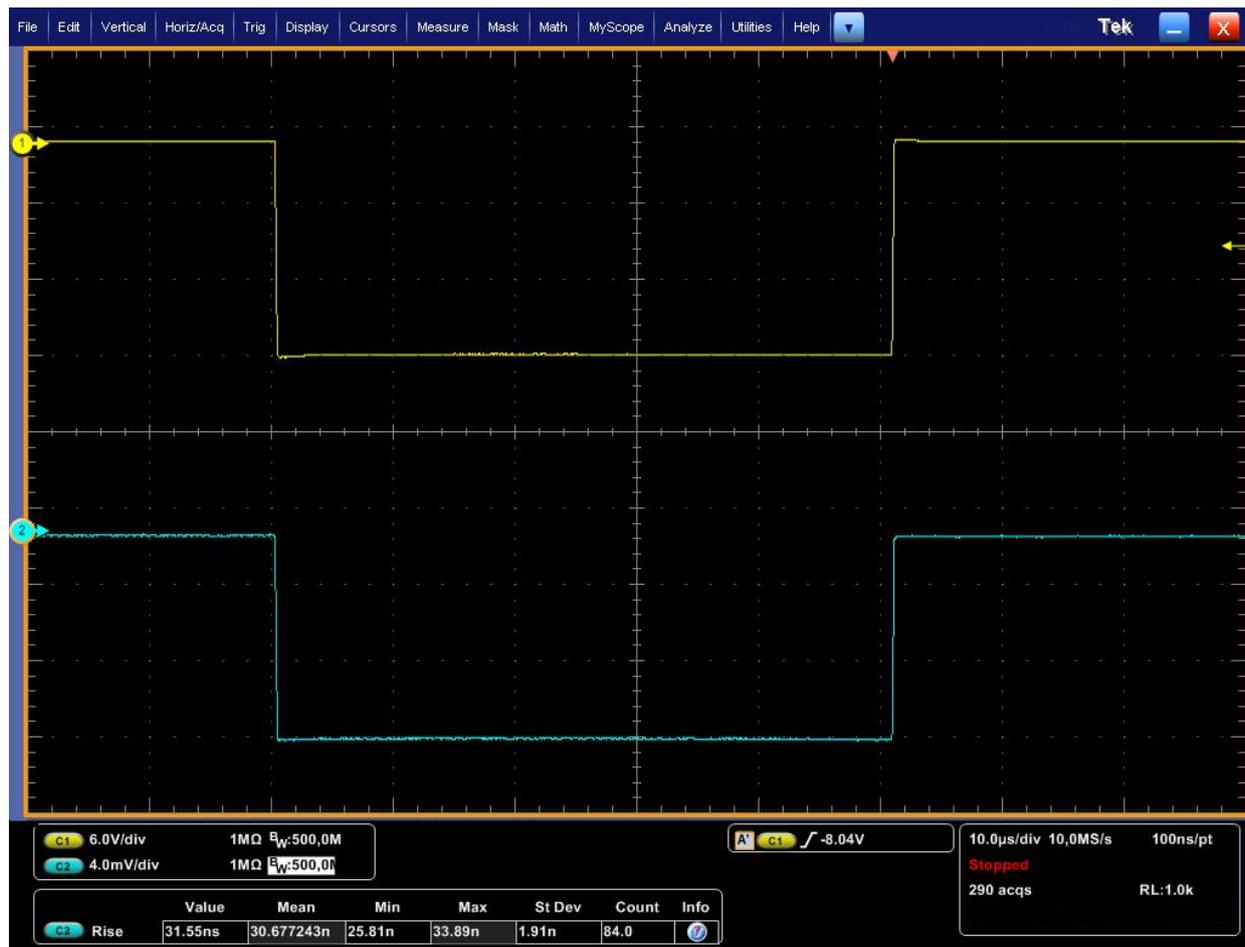


Рис. 2. Осциллограмма входного и выходного импульса ДНВ-20И на развертке 10 мкс

На рис. 3 представлен внешний вид делителя напряжений высоковольтного ДНВ-20И.



Рис. 3. Внешний вид делителя напряжений высоковольтного ДНВ-20И

Для подключения делителя к средствам контроля и измерения в ИИС используется высокочастотный соединительный кабель типа RG-214/U [6].

В табл. 1 приведены основные технические характеристики.

Технические характеристики

Диапазон входных напряжений постоянного тока, кВ	1–18
Диапазон входных напряжений переменного тока частотой 50 Гц, кВ	1–12
Основная относительная погрешность преобразования U_{DC} , %	$\pm 0,1$
Основная относительная погрешность преобразования U_{AC} частотой 50 Гц, %	$\pm 0,5$
Время нарастания переходной характеристики, нс, не более	70
Амплитуда импульса, кВ	60
Диапазон рабочих частот, Гц	$50-5 \cdot 10^6$
Длина кабеля, м, не менее	0,8
Габаритные размеры (H/D/L), мм, не более	280/140/150
Вес, кг, не более	3

Испытательным центром ООО «ОМАКС» были проведены испытания делителей напряжений высоковольтных ДНВ-20И. Рассмотрим проверку на грозовом импульсе. На рис. 4 представлено фото на участке высоковольтных испытаний [7].

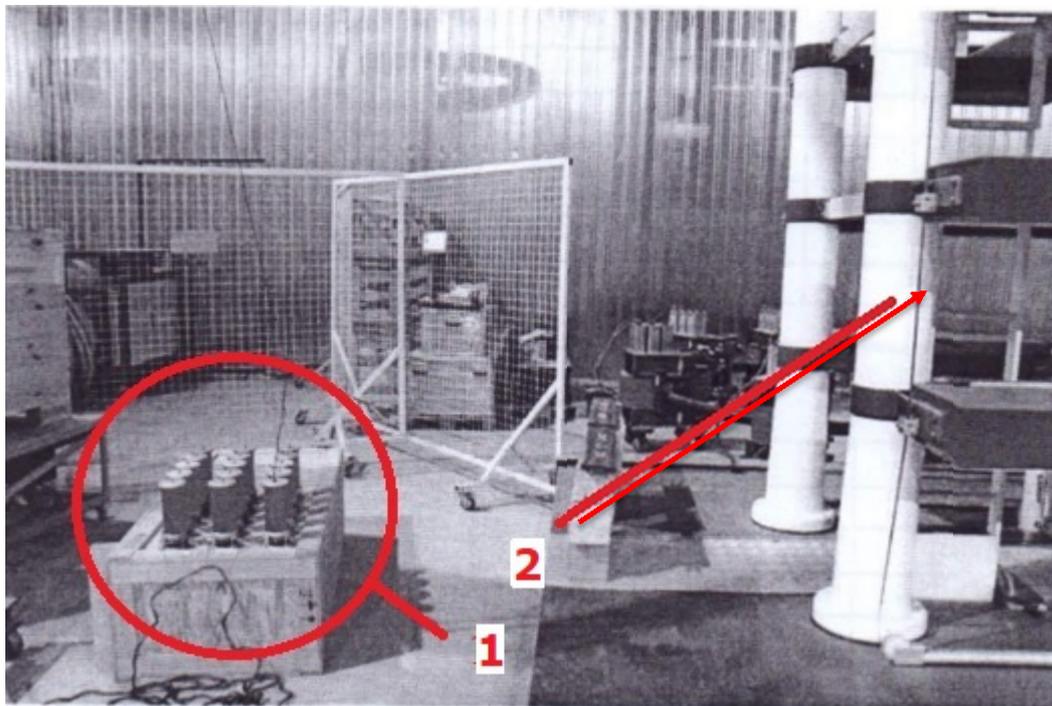


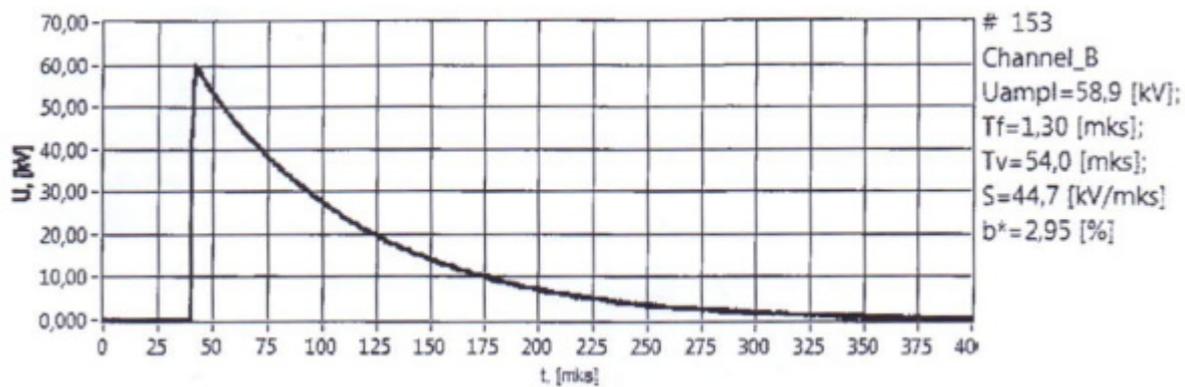
Рис. 4. Импульсные испытания делителей ДНВ-20И:
1 – делители напряжений высоковольтные ДНВ-20И;
2 – система измерения высокого импульсного напряжения СЖДУ-1600/120

На рис. 5 представлены графики результата измерения времени нарастания T_f и длительности T_v грозового импульса (1,2/50) напряжения положительной и отрицательной полярности амплитудой 60 кВ с выхода делителя напряжений ДНВ-20И.

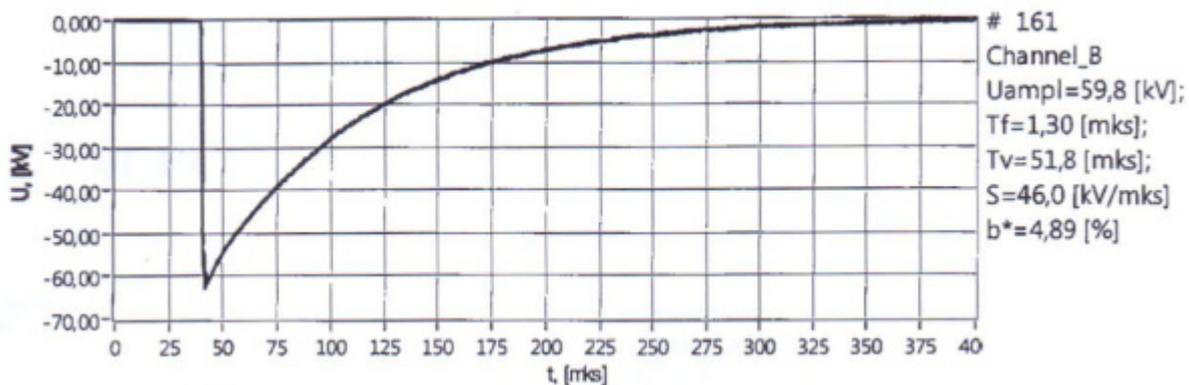
Графики рис. 5 показывают работу ДНВ-20И с импульсным напряжением. Исходя из ГОСТ 1516.2-97, стандартный грозовой импульс имеет время нарастания $T_f = 1,2 \pm 0,36$ мкс и длительность $T_v = 50 \pm 10$ мкс¹.

Анализируя графики, точно определяются параметры измеренных импульсов. На рис. 5 грозовой импульс (1,2/50) положительной полярности имеет $T_f = 1,3$ мкс и $T_v = 54,0$ мкс (рис. 5,а), а отрицательной полярности $T_f = 1,3$ мкс и $T_v = 51,8$ мкс (рис. 5,б). Тем самым делитель без искажений передает фронт и форму импульса.

¹ ГОСТ 1516.2-97. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кв и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции.



a)



б)

Рис. 5. Графики грозных импульсов:
a – положительной полярности; б – отрицательной полярности

Делители напряжений ДНВ-20И находят применение в высоковольтном широкополосном комплексе КМБТ (рис. 6) фирмы ЗАО «ИТЦ Континуум» (г. Ярославль). Комплекс предназначен для измерения постоянного/переменного/импульсного напряжения для лабораторных или промышленных применений. Применим для электроэнергетики, прикладной физики, тестирования электро-медицинского (рентгеновского) и коммуникационного оборудования [8].



Рис. 6. Высоковольтный широкополосный комплекс КМБТ

ЗАО «ИТЦ Континуум» также использует ДНВ-20И в комплексах измерений электрических параметров системы управления электропитанием сверхпроводящих катушек магнитной системы ИТЭР КМБТ.

Комплекс состоит из двух основных компонентов: первичного измерительного преобразователя напряжений (делителя), обеспечивающего масштабное преобразование постоянного и переменного напряжения, а также модуля аналогово-цифрового преобразования (модуля АЦП).

Заключение

Испытания, проведенные ИЦ ООО «ОМАКС», подтверждают соответствие делителей напряжений высоковольтных ДНВ-20И заявленным данным и требованиям ГОСТ 1516.2-97 и ИЕС 60060-1. Делители напряжений могут применяться для измерений высоких напряжений постоянного, переменного и импульсного тока.

Список литературы

1. Бочаров Ю. Н., Дудкин С. М., Титков В. В. Техника высоких напряжений : учеб. пособие. М. : Юрайт, 2018.
2. Делитель напряжения высоковольтный импульсный ДНВ-20И // Высоковольтные измерители напряжения. URL: <https://niemp.ru/pribory/vysokovoltnye-izmeriteli-napryazheniya/item/dnv-20i.html/>
3. Бейер М., Бек В., Меллер К., Цаенгль В. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения : пер с нем. / под ред. В. П. Ларионова. М. : Энергоатомиздат, 1989.
4. HVT-RCR // HILO-Test. URL: <https://www.hilo-test.de/products/product-categories/high-voltage-divider/item/202-hvt-rcr-en>
5. Ильин А. С., Карчев И. А., Большакова А. А., Перевертов В. П. Масштабные преобразователи высокого напряжения для информационно-измерительных систем // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 4. С. 13–19. doi:10.21685/2307-4205-2021-4-2
6. Делители напряжений высоковольтные. Технические условия. РУКЮ.411522.020 ТУ.
7. Лаборатория электрических испытаний // ООО «ОМАКС». URL: <http://omacs.ru/>
8. Широкополосная прецизионная система измерения напряжения КМБТ // Проекты. URL: <http://www.ec-continuum.ru/>

References

1. Bocharov Yu.N., Dudkin S.M., Titkov V.V. *Tekhnika vysokikh napryazheniy: ucheb. posobie = High voltage technique : textbook*. Moscow: Yurayt, 2018. (In Russ.)
2. Voltage divider high-voltage pulse DNV-20I. *Vysokovol'tnye izmeriteli napryazheniya = High-voltage voltage meters*. (In Russ.). Available at: <https://niemp.ru/pribory/vysokovoltnye-izmeriteli-napryazheniya/item/dnv-20i.html>
3. Beyer M., Bek V., Meller K., Tsaengl' V. *Tekhnika vysokikh napryazheniy: teoreticheskie i prakticheskie osnovy primeneniya: per s nem. = High voltage technique: theoretical and practical application bases : translation from German*. Moscow: Energoatomizdat, 1989. (In Russ.)
4. HVT-RCR. *HILO-Test*. Available at: <https://www.hilo-test.de/products/product-categories/high-voltage-divider/item/202-hvt-rcr-en>
5. Il'in A.S., Karchev I.A., Bol'shakova A.A., Perevertov V.P. Large-scale high voltage converters for information and measurement systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(4):13–19. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-4-2
6. High-voltage voltage dividers. Technical conditions. RUKU.411522.020 TU. (In Russ.)
7. Electrical Testing Laboratory. ООО «ОМАКС». (In Russ.). Available at: <http://omacs.ru/>
8. Broadband precision voltage measurement system KMBT. *Proekty = Projects*. (In Russ.). Available at: <http://www.ec-continuum.ru/>

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Сергеевич Ильин
аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40);
начальник лаборатории,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: aalexeiil@mail.ru

Aleksey S. Ilin
Postgraduate student,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia);
head of laboratory,
Scientific Research Institute
of Electro-Mechanical Devices
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Иван Анатольевич Карчев

начальник НПК-4,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: npk4r@niiemp.ru

Александр Павлович Воронов

ведущий инженер,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: npk@niiemp.ru

Ivan A. Karchev

Head of NPK-4,
Scientific Research Institute
of Electro-Mechanical Devices
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

Alexander P. Voronov

Lead engineer,
Scientific Research Institute
of Electro-Mechanical Devices
(44 Karakozova street, Penza, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 15.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 10.01.2022

Принята к публикации/Accepted 15.02.2022

УПРАВЛЕНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ РАСПОЗНАВАНИЯ РАСКАДРОВКИ ОБРАЗОВ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ

Н. Д. Кошелев¹, А. Алхатем², К. С. Новиков³, А. Д. Цуприк⁴, Н. К. Юрков⁵

^{1, 3, 4, 5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

² ООО «Ветлайф», Москва, Россия

¹ spellbinderrus@gmail.com, ² alialhatem@mail.ru, ³ kirillnovikov1@gmail.com,

⁴ tsuprik.rjirf@yandex.ru, ⁵ yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Раскрывается задача анализа, распознавания и управления образами высокой четкости с минимальной погрешностью благодаря предшествующему покадровому распознаванию комплекса изображений низкой четкости. Фундаментальной проблемой является появление и воздействие градиентных помех в виде разукрупненных пиксельных сегментов, в значительной мере снижающих разрешение рассматриваемой области. *Материалы и методы.* До настоящего времени данное направление исследований искусственных нейронных сетей не было достаточно изучено в связи с низким потребительским спросом технологии и медленным развитием от энтузиастов. Несмотря на тот факт, что распознавание изображений не являлось перспективным направлением ранее, на данный момент оно таит в себе потенциал в области применения искусственных нейронных сетей и нивелирования градиентных помех с глубоким обучением на их основе. *Результаты и выводы.* Рассматривается как возможность адаптации старых существующих подходов к решению задачи анализа и распознавания образов, так и предложен новый метод управления на основе комплекса раскадровки искусственных нейронных сетей с дальнейшим объединением для глубокого обучения и решения поставленных задач.

Ключевые слова: образ, искусственная нейронная сеть, глубокое обучение, градиентные помехи, раскадровка

Для цитирования: Кошелев Н. Д., Алхатем А., Новиков К. С., Цуприк А. Д., Юрков Н. К. Управление искусственных нейронных сетей распознавания раскадровки образов высокого разрешения // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 85–91. doi:10.21685/2307-4205-2022-2-10

MANAGEMENT OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS FOR RECOGNITION MAPPING OF HIGH-DEFINITION IMAGES

N.D. Koshelev¹, A. Alhatem², K.S. Novikov³, A.D. Tsuprik⁴, N.K. Yurkov⁵

^{1, 3, 4, 5} Penza State University, Penza, Russia

² Vetlife LLC, Moscow, Russia

¹ spellbinderrus@gmail.com, ² alialhatem@mail.ru, ³ kirillnovikov1@gmail.com,

⁴ tsuprik.rjirf@yandex.ru, ⁵ yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* Scientific article reveals the problem of analyzing, recognizing and managing high-definition images with a minimum error due to the previous frame-by-frame recognition of a complex of low-definition images. The fundamental problem is the appearance and impact of gradient noise in the form of disaggregated pixel segments, which significantly reduce the resolution of the area under consideration. *Materials and methods.* Until now, this area of research on artificial neural networks has not been sufficiently studied due to low consumer demand for the technology and slow development from enthusiasts. Despite the fact that image recognition was not a promising direction before, at the moment it holds potential in the field of application of artificial neural networks and gradient noise leveling with deep learning based on them. *Results and conclusions.* The article considers both the possibility of adapting old existing approaches to solving the problem of pattern analysis and recognition, and a new control method based on a complex of storyboarding artificial neural networks with further integration for deep learning and solving problems.

Keywords: image, artificial neural network, deep learning, gradient noise, mapping

For citation: Koshelev N.D., Alhatem A., Novikov K.S., Tsuprik A.D., Yurkov N.K. Management of artificial neural networks for recognition mapping of high-definition images. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(2):85–91. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-2-10

Введение

Качество цифровых образов является комплексным собирательным понятием, зависящим как от ограничений передаточных систем и каналов связей, так и характеристик сред формирования и обработки. Для образов качественным параметром является высокое разрешение (ВР), соответствующее поставленным для конкретных целей задачам и отвечающее требуемому уровню детализации и обрисовки сцен. В связи с ограничениями некоторых сред формирования и обработки образов на аппаратном уровне не представляется возможным получение изображений ВР без дополнительной постобработки [1]. Для таких сред с формированием образов в низком разрешении (НР) следует применить распознавание на основе алгоритмической раскадровки, улучшающей и адаптирующей качество образов и четкость детализации благодаря покадровой обработке сцен образов. Алгоритмы раскадровки позволяют получить искомые образы ВР путем заполнения комплекса изображений НР одного и того же кадра и их осевого смещения пикселей в конкретных сценах.

Одним из негативных факторов прямого воздействия на выходное качество образов является появление градиентных помех и их влияние на распределение разукрупненных пикселей. Фрагментарное разукрупнение образов формируют области пиксельных перекрытий, снижающих итоговое качество. Такие области не могут быть устранены путем образной фильтрации, и многие современные алгоритмы фундаментально не приспособлены к их нивелированию [2]. Итерационные алгоритмы линейной и нелинейной фильтрации способны решить данную проблему, однако зачастую не оправданы практически в связи с рядом допущений при построении математических моделей.

Задача управлением постобработкой образов требует более адаптивной динамики подходов, которыми могут выступать методы глубокого обучения посредством специальной архитектуры искусственных нейронных сетей – сверточных нейронных сетей и их вариаций в зависимости от сложности решения текущей проблемы. Глубокое обучение и сверточные нейронные сети могут применяться для управления решением покадровых задач постобработки благодаря отсутствию необходимости построения математических моделей, но при этом накладываются ограничения, типичные для процесса обучения, в виде большого объема обучающих выборок, большого объема данных анализируемых примеров образов и времени на обработку и обучение.

Научной новизной представленного в работе метода является адаптация преимуществ глубокого обучения сверточных нейронных сетей и сегментации градиентных помех в предобработке образов НР в конкретном комплексе задач посредством алгоритмической раскадровки.

Управление постобработкой образов

Для решения поставленной в работе задачи управления качеством образов в частных случаях применяется адаптивный подход с уточнением оценок комплексов сцен. Условимся, что имеется N образов НР F^Q подряда (d^t, w^t, c) , которые подвергаются воздействию градиентных помех и фрагментарному разукрупнению пикселей [3]. Задачей поставим получение изображения ВР (F^H) с качеством выше исходного без воздействия градиентных помех.

Частным решением поставленной задачи будет являться подход с применением алгоритмического оценочного комплекса. Помимо текущей задачи сегментации градиентных помех на схеме итеративной постобработки значительным преимуществом также является оценка образа и ее точность, на основании которой определяется качество осевого смещения пикселей между образами одной сцены. Воздействие градиентных помех напрямую влияет на оценочный показатель, поскольку попиксельно снижает качество выбранной области. Подход с применением оценочных уточнений учитывает возможные недочеты при регистрации образов в НР и при обновлении их оценки формирует обновление оценки образа ВР. Схема постобработки образов с оценочной системой (рис. 1) состоит из трех последовательных итераций:

- 1) оценка осевого смещения пикселей соседствующих последовательных образов одной сцены и регистрация текущего образа;
- 2) управление полученной оценки образа в ВР для ее обновления;
- 3) возобновление оценочного цикла до получения искомого результата.

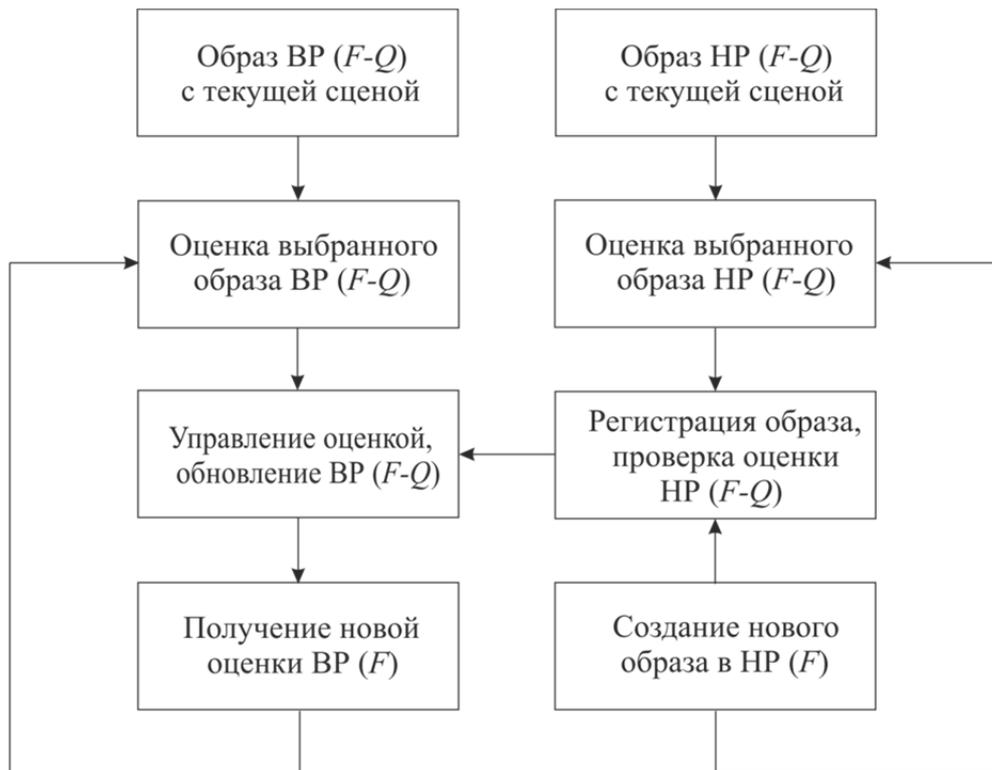


Рис. 1. Схема итерации постобработки образов с оценочной системой

Главным преимуществом представленной схемы постобработки образов является управление точностью оценки образа ВР благодаря осевому смещению пикселей образов одной сцены НР. Полученная в ходе каждой итерации оценки образов НР информация способствует нивелированию негативного влияния градиентных помех. Особенностью схемы является одновременное нивелирование градиентных помех вместе с повышением разрешения образов НР и ВР соответственно. Последовательность обработки образов НР не является фиксированной и имеет свободную длину с одинарной обработкой текущей сцены.

В связи с приближенной точностью оценочных подходов, не гарантированно ссылающихся на точные предположения о статистических свойствах исходных образов, возможно образование «некорректных оценок».

Отсутствие строгих баз правил формирования длин обработки выбранных сцен влияет не только на итоговый результат, но и на затрачиваемое на каждую итерацию обработки сцен время.

Обработка образов с применением искусственных нейронных сетей

Для решения задачи повышения качества образов и нивелирования негативного влияния градиентных помех лучшим выбором будут искусственные нейронные сети (ИНС). ИНС и управление на их основе не нуждаются в моделях данных и отличаются исключительным быстродействием при уже обученной структуре.

Подход с применением ИНС, со сверточными нейронными сетями в частности, для регистрации образов и повышения/восстановления их разрешения уже был практически реализован в алгоритме FVRSR [4]. Регистрация образов НР фиксировалась посредством сверточной нейронной сети LiteFlowNet2, разработанной на основе CVPR LiteFlowNet и имеющей с решенной проблемой оценки оптического потока, мешающей работе над образами в предыдущей версии [5]. Применение LiteFlowNet2 позволит в дальнейшем повысить точность оценок НР и улучшит итоговую детализацию отображений сцены. В качестве программной библиотеки для глубокого обучения LiteFlowNet2 используем TensorFlow.

Управление сверточной нейронной сетью осуществляется посредством обработки приема двух образов разного разрешения: оценка ВР и образ в НР с повышенной четкостью посредством осевого смещения пикселей и раскадровки. Итоговым результатом их слияния будет один образ с обновленной оценкой по аналогичной схеме (рис. 1).

После проведения ряда исследовательских работ удалось получить результат в виде частично-го нивелирования градиентных помех, однако такой подход не решает проблему воздействия помех, изначально воздействующих на образ-первоисточник. Воздействие на первоисточник приведет к появлению пиксельных искажений даже после прохождения через постобработку с оценочной системы. Более того, такой подход не даст результатов в области глубокого обучения нейронной сети, предлагая фундаментально некорректные области распознавания и неверно их адаптируя. Для гипотетического улучшения схемы постобработки образов (рис. 1) добавим в алгоритм работы расчет средней оценки-первоисточника с последовательной обработкой и обособленной пиксельной сегментацией.

Внедрение сверточной нейронной сети для раскадровки с средней оценкой-первоисточником и последовательной обработкой можно адаптировать созданные ранее подходы с классической оценочной системой без применения ИНС. Внедрение ИНС позволит реализовать управление предварительно обученными нейронными сетями по принципу DAG-сети, позволяющей планомерно компоновать комплексную раскадровку образов для получения новой, отличной от текущих оценку ВР [6].

Описательная часть работы новой схемы с управлением ИНС заключается в следующих последовательных этапах:

- 1) начало работы управления ИНС;
- 2) формирование средней оценки первоисточника ВР на основе НР-образов-первоисточников текущей сцены;
- 3) регистрация образа текущей сцены;
- 4) пиксельная сегментация областей, пострадавших от воздействия градиентных помех на текущей НР-сцене;
- 5) компоновка и обновления новой оценки на основе данных о пиксельной сегментации областей с градиентными помехами и текущей оценки сцены образа НР;
- 6) цикличное повторение пунктов № 2–4 до получения удовлетворительного результата в виде комплекса раскадровки образов НР;
- 7) окончание работы цикла при получении последней оценки образа ВР и ее принятие как итогового образа ВР;
- 8) конец управления, завершение работы.



Рис. 2. Новая схема постобработки образов с управлением ИНС

Для новой схемы регистрирование последующих образов НР происходит посредством нейронной сети LiteFlowNet2 и осевого смещения рассматриваемого образа на образ-первоисточник. Каждый слой сверточной нейронной сети для подхода с раскадровкой образов и средней оценкой НР пошагово увеличивает итоговое качество результата, образуя комплекс двух совместно работающих подсетей и решением проблемы градиентных помех и пиксельных искажений.

Обучение ИНС и раскадровка образов

Обучение ИНС и сверточной нейронной сети, в частности, придерживается принципа оптимального глубокого обучения – отсутствия лишних обучающих выборок, отсутствие необходимости в переобучении и избегание ошибочного обучения. Обучение сверточной нейронной сети будет происходить методом стохастического градиентного спуска с выборкой из 50 изображений НР одной сцены с разным процентным градиентным повреждением четкости [7]. Для защиты от переобучения применим подход «исключение» с методом выбрасывания случайных одиночных нейронов – дропаут. Поскольку в основе работы сверточной нейронной сети лежат полносвязные слои, требуется объединение сцен образов в обучающий набор. Тогда обучающий набор для сверточной нейронной сети с набором n образов l подряд будет вычисляться по формуле

$$f(h^{(i)} = l / z_l^{(i)}) = \frac{e^{z_l^{(i)}} l}{\sum_{n=1}^k e^{z_n^{(i)}} n}, \quad (1)$$

где n – текущий набор образов текущей сцены; $h^{(i)}$ – первая половина обучающего набора в НР с i -м положительным фрагментом сцены; l – подряд текущего набора образов; $z_l^{(i)}$ – вторая половина обучающего набора в НР с i -м отрицательным фрагментом сцены.

В связи с количественным преобладанием степеней свободы в сверточных нейронных сетях они склонны к незначительной погрешности в выходных данных, допустимых для нашего исследования и не усугубляющих ВР с точки зрения ухудшения качества градиентными помехами. На рис. 3 наглядно демонстрируется практический результат работы в LiteFlowNet2. Результаты изображений 2 и 3 соответствуют подходу, приведенному на рис. 1, схеме постобработки без применения ИНС и глубокого обучения. Изображение 4 минимально подвержено градиентным помехам и показывает наиболее близкий к оригиналу результат и соответствует уровню четкости образа в ВР.

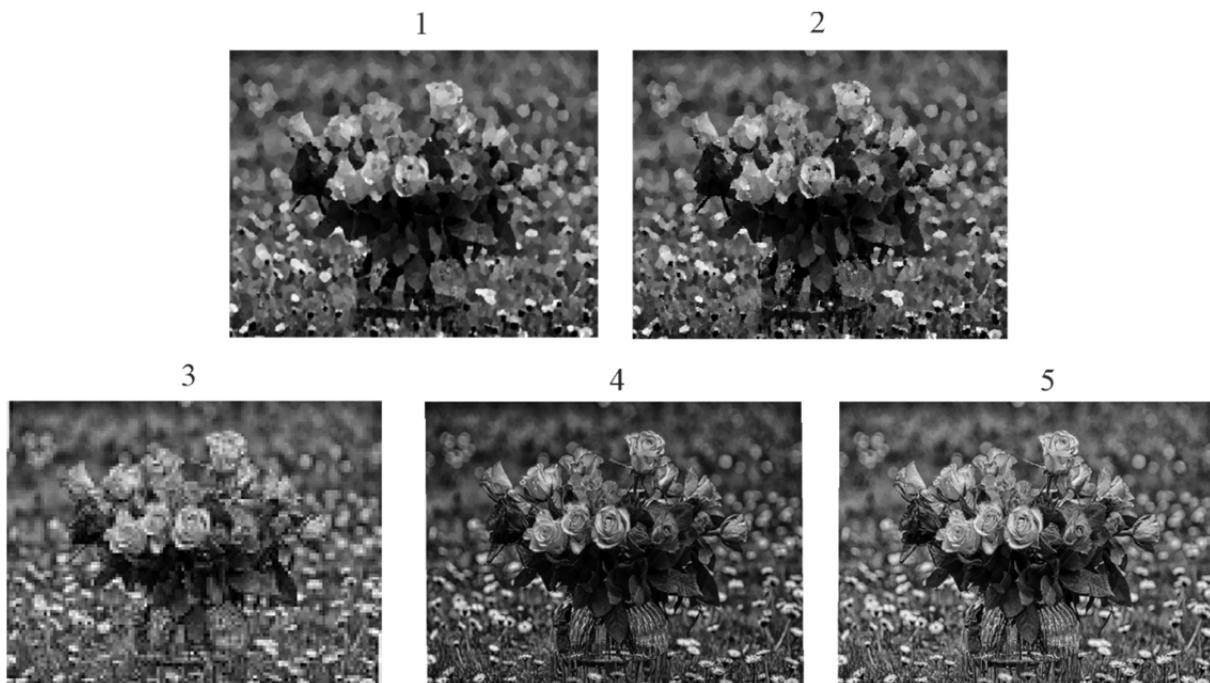


Рис. 3. Результаты работы управлением раскадровкой в LiteFlowNet2:
 1 – образ-первоисточник в НР; 2 – образ с оценочной системой (см. рис. 1);
 3 – образ с частичным нивелированием градиентных помех; 4 – образ по новой
 схеме постобработки с управлением ИНС; 5 – оригинал изображения в ВР

Заключение

Таким образом, представленный в работе новый подход к постобработке образов с применением ИНС и глубокого обучения показывает более качественный результат в области нивелирования градиентных помех и получения выходных образов ВР, чем предшествующий вариант без применения сверточных нейронных сетей и обучения. В дальнейшем точность применяемого подхода может быть увеличена за счет новой версии среды обучения LiteFlowNet3 при ее окончательной отладке и готовности к массовому использованию.

Список литературы

1. Kawano M., Mikami K., Yokoyama S. [et al]. Road marking blur detection with drive recorder // International Conference on Big Data. 2017. P. 4092–4097.
2. Astafyev A., Gerashchenko S., Yurkov N. [et al.]. Neural Network System for Medical Data Approximation // Information Technology in Medical Diagnostics III – Metrological Aspects of Biomedical Research. 2021. P. 81–90.
3. Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton G. E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks // Commun ACM. 2017. Vol. 60. P. 84–90. doi:10.1145/3065386
4. Molini A. B., Valsesia D., Fracastoro G., Magli E. DeepSUM: Deep neural network for super-resolution of unregistered multitemporal images // IEEE Trans Geosci Remote Sens. 2020. Vol. 58. P. 3644–3656. doi:10.1109/TGRS.2019.2959248
5. Дивеев А. И., Полтавский А. В., Алхатем А. Нейро-нечеткое управление процессом сушки пиломатериалов // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3. С. 93–97.
6. Алхатем А. Нейро-нечеткое регулирование кондиционированием офисных зданий с учетом показателя временной комфортности // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2021. Т. 1. С. 144–146.
7. Grigoriev A. V., Kochegarov I. I., Yurkov N. K. [et al.]. Research on the possibility to apply vibration blurring of a round mark image in technical condition monitoring of moving mechanisms // Procedia Computer Science. 14th International Symposium "Intelligent Systems", INTELS 2020". 2021. P. 736–742.

References

1. Kawano M., Mikami K., Yokoyama S. [et al]. Road marking blur detection with drive recorder. *International Conference on Big Data*. 2017:4092–4097.
2. Astafyev A., Gerashchenko S., Yurkov N. [et al.]. Neural Network System for Medical Data Approximation. *Information Technology in Medical Diagnostics III – Metrological Aspects of Biomedical Research*. 2021:81–90.
3. Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton G.E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Commun ACM*. 2017;60:84–90. doi:10.1145/3065386
4. Molini A.B., Valsesia D., Fracastoro G., Magli E. DeepSUM: Deep neural network for super-resolution of unregistered multitemporal images. *IEEE Trans Geosci Remote Sens*. 2020;58:3644–3656. doi:10.1109/TGRS.2019.2959248
5. Diveev A.I., Poltavskiy A.V., Alkhatem A. Neuro-fuzzy control of the lumber drying process. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(3):93–97. (In Russ.)
6. Alkhatem A. Neuro-fuzzy regulation of air conditioning of office buildings taking into account the indicator of temporary comfort. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2021;1:144–146. (In Russ.)
7. Grigoriev A.V., Kochegarov I.I., Yurkov N.K. [et al.]. Research on the possibility to apply vibration blurring of a round mark image in technical condition monitoring of moving mechanisms. *Procedia Computer Science. 14th International Symposium "Intelligent Systems", INTELS 2020"*. 2021:736–742.

Информация об авторах / Information about the authors

Никита Дмитриевич Кошелев

инженер кафедры конструирования
и производство радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: spellbinderrus@gmail.com

Али Алхатем

IT-специалист,
ООО «Ветлайф»
(Россия, г. Москва, Бескудниковский бульвар, 12)
E-mail: alialhatem@mail.ru

Nikita D. Koshelev

Engineer of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Ali Alkhatem

IT-specialist,
Vetlife LLC
(12 Beskudnikovskiy boulevard, Moscow, Russia)

Кирилл Сергеевич Новиков

заведующий лабораторией
кафедры конструирования
и производства радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: kirill1novikov1@gmail.com

Александр Дмитриевич Цуприк

инженер кафедры конструирования
и производство радиоаппаратуры,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tsuprik.rjirf@yandex.ru

Николай Кондратьевич Юрков

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

Kirill S. Novikov

Head of laboratory of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Aleksandr D. Tsuprik

Engineer of the sub-department
of radio equipment design and production,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Nikolay K. Yurkov

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

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 29.05.2021

Поступила после рецензирования/Revised 30.06.2021

Принята к публикации/Accepted 14.09.2021

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

TECHNOLOGICAL BASIS FOR IMPROVING RELIABILITY AND PRODUCT QUALITY

УДК 658.562

doi:10.21685/2307-4205-2022-2-11

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА И СОЗДАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ КОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЫ ТРУБОПРОВОДНОГО ТРАНСПОРТА ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ

Г. И. Коршунов¹, Р. И. Сольнищев², Е. А. Фролова³

^{1,3} Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия

^{1,3} Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»

имени В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

^{1,3} kgi@pantes.ru, ² ssccte.leti@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассмотрены математические модели физических процессов, происходящих в техногенных объектах, системах трубопроводного транспорта энергоносителей подземной и морской прокладки, на основе законов сохранения и уравнений математической физики. *Материалы и методы.* Показано, что упрощение полученных моделей путем приведения их к форме «вход-выход» достаточно для программно-аппаратной реализации в виде киберфизических систем. Приведены примеры технических средств мониторинга и управления электрохимической защитой. *Результаты и выводы.* Показано, что обеспечение качества и интеллектуализация систем коррозионной защиты трубопроводного транспорта энергоносителей достигается поэтапным внедрением технологических инноваций в известные технические средства.

Ключевые слова: трубопроводный транспорт энергоносителей, коррозионная защита, математические модели, интеллектуальные системы

Для цитирования: Коршунов Г. И., Сольнищев Р. И., Фролова Е. А. Обеспечение качества и создание интеллектуальных систем коррозионной защиты трубопроводного транспорта энергоносителей // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 92–101. doi:10.21685/2307-4205-2022-2-11

QUALITY ASSURANCE AND CREATION OF INTELLIGENT CORROSION PROTECTION SYSTEMS FOR PIPELINE TRANSPORTATION OF ENERGY CARRIERS

G.I. Korshunov¹, R.I. Sol'nitsev², E.A. Frolova³

^{1,3} St. Petersburg State University Aerospace Instrumentation, St. Petersburg, Russia

^{1,3} Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

² St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin), St. Petersburg, Russia

^{1,3} kgi@pantes.ru, ² ssccte.leti@gmail.com

Abstract. *Background.* The article considers mathematical models of physical processes occurring in man-made objects, systems of pipeline transport of energy carriers underground and offshore, based on conservation laws and equations of mathematical physics. *Materials and methods.* It is shown that the simplification of the obtained models by bringing them to the form of "input-output" is sufficient for software and hardware implementation in the form of cyber-physical systems. Examples of technical means for monitoring and controlling electrochemical protection are given. *Results and conclusions.* It is shown that quality assurance and intellectualization of corrosion protection systems for pipeline transport of energy carriers is achieved by the gradual introduction of technological innovations into known technical means.

Keywords: pipeline transport of energy carriers, corrosion protection, mathematical models, intelligent systems

For citation: Korshunov G.I., Sol'nitsev R.I., Frolova E.A. Quality assurance and creation of intelligent corrosion protection systems for pipeline transportation of energy carriers. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(2):92–101. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-2-11

Введение

Необходимость использования трубопроводного транспорта энергоносителей в РФ очевидна. К энергоносителям относятся нефть, газ, вода холодная и горячая для систем отопления, пар. Необходимость обеспечения качества процессов такого транспорта обусловлена наличием техногенных аварий и катастроф, число которых возрастает по мере выработки ресурса. К числу важнейших факторов, влияющих на техническое состояние трубопроводов, относится коррозия. Защита от воздействия причин возникновения коррозии осуществляется разными средствами, однако во всех стандартах по этой тематике присутствует электрохимическая защита (ЭХЗ). Это обусловлено значимостью ЭХЗ по сравнению с другими видами защиты, а также наличием математического, методического и экспериментального задела, необходимого для цифровизации объектов. Однако проблема по упрощению известных математических моделей по-прежнему стоит остро, и в их практическом применении недостаточно представлен формализованный аппарат.

Целью работы является обеспечение качества систем коррозионной защиты трубопроводного транспорта энергоносителей на основе построения математических моделей физических процессов, происходящих в техногенных объектах, упрощение и приведение их к виду «вход-выход» для практического применения, создание интеллектуальных цифровых систем коррозионной защиты с использованием имеющегося технического и методического задела и последовательного внедрения технологических инноваций.

Материалы и методы

Факторы, определяющие коррозию, методы и стандарты мониторинга и защиты от коррозии

Назначение (целевая функция) и задачи электрохимической защиты (ЭХЗ) определены нормативными документами, согласно которым мероприятия по ЭХЗ трубопроводов входят в систему планово-предупредительного ремонта функциональных структур энергохозяйства; эта система может быть определена как совокупность организационно-технических мероприятий по надзору и уходу за подземными коммуникациями с целью предупреждения их преждевременного износа, предотвращения аварий и обеспечения бесперебойной подачи энергии потребителям [1]. При этом катодная защита трубопроводов осуществляется в соответствии с требованиями¹.

Катодная защита реализуется наложением отрицательного потенциала от специального выпрямителя переменного тока на защищаемый участок линейной части трубопровода. Этот участок соединяется с отрицательным полюсом выпрямителя, который является основным функциональным элементом станции катодной защиты. В свою очередь положительный полюс соединен с анодным контуром (заземляющим устройством). Управление катодной защитой проводится путем поддержания необходимого защитного потенциала металлической стенки трубы относительно земли; этот потенциал может быть измерен на специальных контрольно-измерительных пунктах с помощью стационарных или переносных электродов сравнения. Создание и поддержание необходимого зна-

¹ ГОСТ 9.602. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии ; ГОСТ Р 51164-98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии ; СП 378.1325800.2017. Морские трубопроводы. Правила проектирования и строительства.

чения поляризионного защитного потенциала на внешней поверхности объекта достигается путем наложения внешнего выпрямленного тока. Величина поляризионного защитного потенциала ϕ служит количественной мерой качества катодной защиты, а критерием защищенности в каждой точке является выполнение условия $\phi_{\min} \leq \phi \leq \phi_{\max}$. Выполнение этого условия обеспечивается в настоящее время применением средств ЭХЗ, включающих, в частности, при применении катодной защиты электрод сравнения, датчик потенциала, анодное заземление, источник постоянного тока (преобразователь тока промышленной частоты в выпрямленный ток), средства сбора, формирования и интерпретации данных о величине поляризионного потенциала. В существующей технологии применяются неавтоматизированные, частично или полностью автоматизированные средства стабилизации поляризионного потенциала.

Математические модели коррозионного мониторинга систем трубопроводного транспорта

Системы транспортировки энергоносителей – это один из важнейших видов техногенных систем. Протяженные магистральные системы прокладываются и эксплуатируются в земле, море и пограничных средах. Нормативными документами установлены требования к обеспечению функционирования трубопроводов¹, в том числе к управлению защитой от коррозии. В этом случае характер взаимодействия поверхности стального трубопровода с различными средами достаточно сложен и описывается дифференциальными уравнениями в частных производных (ДУЧП). Математические модели электрохимического процесса защиты трубопроводов являются основой для разработки средств мониторинга и управления защитой трубопроводов от коррозии. Важнейшим критерием качества систем защиты трубопроводов от электрохимической коррозии внешним током является величина электродного потенциала защищаемой поверхности. В случае коррозии небольших по размеру объектов величина потенциала адекватно отражает степень защищенности. Однако когда речь идет о коррозии трубопроводов, характеризующихся большой протяженностью, поверхность металла нельзя считать изопотенциальной, поэтому коррозия может иметь неравномерный характер. Для эффективной электрохимической защиты трубопроводов целесообразно использовать математические модели для расчета распределения поляризионного потенциала с учетом нелинейной зависимости поляризионного потенциала от плотности управляющего тока и конечного числа точек подключения средств контроля и управления защитой. Основная задача математического моделирования мониторинга и управления сводится к нахождению характеристик защитного электрического поля по положению создающих поле источников и физических параметров среды.

Подземные трубопроводы

Сравнительно большая продолжительность протекания рассматриваемых процессов позволяет использовать для их описания квазистатическое приближение, т.е. ввести потенциал ϕ , удовлетворяющий уравнению Пуассона. Нахождение распределения поляризионного потенциала на поверхности подземных металлических трубопроводов требует знания распределения потенциала ϕ , создаваемого в грунте токами, протекающими через наружную поверхность трубопровода, имеющую контакт с грунтом. Расчет распределения потенциала производится в предположении, что подземные трубопроводы расположены в однородном проводящем полупространстве с удельным сопротивлением ρ_s . Среда, с которой граничит полупространство, принимается непроводящей. В этих условиях распределение потенциала ϕ в проводящей среде является решением уравнения Пуассона

$$\nabla^2 \phi = -\rho_s \cdot \sum_{v=1}^N I_v \cdot \delta(P - \Psi_v), \quad (1)$$

где P – точка наблюдения на поверхности трубопровода; Ψ_v – точка расположения источника с номером t ; I_v – управляемый ток источника.

¹ ГОСТ 9.602. Единая система защиты от коррозии и старения. Сооружения подземные. Общие требования к защите от коррозии; ГОСТ Р 51164-98. Трубопроводы стальные магистральные. Общие требования к защите от коррозии.

Принимая во внимание, что на практике каждое поперечное сечение можно считать эквипотенциальным, благодаря чему потенциал металла ϕ_M оказывается зависящим только от продольной (по отношению к трубопроводу) координаты. Уравнение, описывающее продольное распределение потенциала металла, принимает вид

$$\frac{d^2\phi_M}{dx^2} = r(P) \cdot i(P), \quad (2)$$

где $r(P)$ – погонное продольное сопротивление трубопровода в рассматриваемой точке; $i(P)$ – ток, стекающий в среду через поперечное сечение трубопровода.

Предполагая, что плотность тока, стекающего в среду, во всех точках поперечного сечения одинаковая, можно считать, что эта плотность тока создается линейным источником тока с погонной производительностью $i(\Psi)$, расположенным на оси трубопровода. Тогда потенциал, создаваемый токами, протекающими через поперечное сечение трубопровода, может быть представлен в виде

$$\phi(P) = \rho_s \cdot \int_{-L}^L i(\Psi) G(P, \Psi) d\Psi, \quad (3)$$

где $(-L; L)$ – рассматриваемый участок трубопровода; Ψ – точка расположения источника тока на рассматриваемом участке; $G(P, \Psi)$ – функция Грина, учитывающая свойства среды. Решение интегрального уравнения приведено в [2, 3]

В условиях трубопровода с множеством сосредоточенных нагрузок потенциал ϕ_0 , создаваемый N источниками управляющего тока, определяется по формуле

$$\phi_0(x) = \rho_s \sum_{v=1}^N I_v \cdot G(x, \xi_v), \quad (4)$$

где I_v – управляющий ток v -го источника; $G(P, \xi_v)$ – функция влияния (4), учитывающая координаты точки наблюдения $P(x, y, z)$ и точек расположения источников тока $\Psi_v(\xi_v, \eta_v, \zeta_v)$.

Тогда система уравнений для определения распределения тока вдоль заданного трубопровода примет вид

$$\begin{cases} -\lambda\phi_{11} + i(x) + \lambda \int_{-L}^L K(x, \xi) \cdot [i(\xi) - i(x)] d\xi + \lambda\chi(x)i(x) = -\lambda\rho_s \sum_{v=1}^N I_v \cdot G(x, \xi_v), \\ \int_{-L}^L i(\xi) d\xi + \sum_{v=1}^N I_v = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Переходя от первого и второго интеграла к разностным уравнениям, получим

$$\begin{cases} -\lambda\phi_{11} + F(x_j) \cdot i(x_j) + \lambda \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n B_{j,k} \cdot i(x_k) = -\lambda\rho_s \sum_{v=1}^N I_v \cdot G(x_j, \xi_v) + \rho_3(x_j), \\ \sum_{k=1}^n A_k i(x_k) = -\sum_{v=1}^N I_v - \rho_4(x_j), \end{cases} \quad (6)$$

где $\rho_3(x_j)$ и $\rho_4(x_j)$ – погрешности, получающиеся в результате перехода от интегральных уравнений к системе разностных уравнений.

Отбрасывая в правой части равенств (6) малые величины $\rho_3(x_j)$ и $\rho_4(x_j)$, точные значения которых неизвестны, получим следующую систему $n+1$ уравнений с $n+1$ неизвестными $\tilde{\phi}_{11}$, $\tilde{i}(x_1), \tilde{i}(x_2), \dots, \tilde{i}(x_n)$:

$$\begin{cases} -\lambda\tilde{\phi}_{11} + F(x_j) \cdot \tilde{i}(x_j) + \lambda \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n B_{j,k} \cdot \tilde{i}(x_k) \cong -\lambda\rho_s \sum_{v=1}^N I_v \cdot G(x_j, \xi_v), \\ \sum_{k=1}^n A_k \tilde{i}(x_k) \cong -\sum_{v=1}^N I_v. \end{cases} \quad (7)$$

Модель «вход-выход» для объекта управления в системе электрохимической защиты от блуждающих токов через почву выводится из системы уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d^2 \phi_M(x)}{dx^2} = r(x) \cdot i(x), \\ i(x) = \frac{1}{R_c} \left(-\rho_x \int_{-L}^L i(\xi) G(x, \xi) d\xi + \phi_M^-(x) - \phi_0^-(x) \right), \\ \int_{-L}^L i(x) dx + I = 0. \end{array} \right. \quad (8)$$

После преобразований Лапласа при нулевых начальных условиях найдем [2]:

$$\frac{\phi_M}{\phi_0} = \frac{1}{p^2 - \Psi(\rho, R_c, L, I)}. \quad (9)$$

По найденному распределению тока вдоль трубопроводной системы определяется распределение смещения регулируемого потенциала на поверхности трубопроводной системы и защищенность трубопроводной системы от коррозии по формуле

$$\eta_p(x_j) = R_c(x_j) \cdot \tilde{i}(x_j), \quad (10)$$

Определение смещения потенциала под действием токов дает возможность приблизить значения токов установок электрохимической защиты к оптимальным значениям. Оценка условий достижения катодной защиты по выбранному критерию заключается в требовании обеспечения защитных параметров в ряде фиксированных контрольных точек.

Обозначим число независимых станции катодной защиты N_2 , координаты контрольных точек x_1 (в выбранной системе координат, например, в зависимости от расстояния до начальной точки трубопроводов по длине трассы). Для решения поставленной задачи необходимо рассчитать значения смещения потенциала, создаваемые в каждой контрольной точке отдельными станциями. Результатом расчета будет квадратная матрица W размерностью $(N_2 \times N_2)$, которая позволяет найти вектор значений смещения потенциала в контрольных точках по известному вектору значений выходных токов I катодных станций по формуле

$$\phi_1 = WI. \quad (11)$$

Если требуется, чтобы в контрольных точках при работе системы катодной защиты поддерживались заданные значения смещения потенциалов, образующие вектор заданных значений V_1 , необходимое распределение токов между станциями может быть найдено по формуле

$$I = W^{-1}V_1. \quad (12)$$

В случае, когда число контрольных точек N_1 и число станций N_2 не совпадают, $N_2 > N_1$, т.е. имеются станции, выходной ток которых управляется другим способом, формула (11) принимает следующий вид:

$$I = W^{-1}(V_1 - W_2 I_2), \quad (13)$$

где W_2 – матрица размерности $N_1 \times (N_2 - N_1)$, определяющая влияние «неуправляемых» станций на смещения потенциалов в контрольных точках; I_2 – вектор выходных токов неуправляемых станций размерности $(N_2 - N_1)$.

Аналогичные преобразования исходных распределенных моделей объектов управления для различных сред приводятся на основе общих уравнений неразрывности [2–4]. В случае многокоординатной зависимости $y(t, \xi, \eta, \zeta)$ оценку влияния движения по координатам ξ, η, ζ получим на основе известной теоремы о первых интегралах дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка [5].

Морские трубопроводы

В настоящее время защита от коррозии трубопроводов, пересекающих значительные водные пространства под водой, обеспечивается системой кольцевых протекторов, периодически расположенных с определенным шагом вдоль трубопровода [6, 7]. Сказанное выше справедливо лишь при условии отсутствия блуждающих токов в среде, в которой проложен трубопровод. Ситуация существенно изменяется при взаимодействии трубопровода с электрическим полем блуждающих токов в море. Токи протекторов зависят от расположения протекторов относительно оконечности трубопровода. Максимального значения достигает ток протектора, ближайшего к концу трубопровода. При напряженности внешнего электрического поля $E_0 = 0,5$ мВ/м это значение составляет $I_{\text{пр(макс)}} = 5,25$ А. При таком токе срок службы протектора составит может быть уменьшен. Токи остальных протекторов могут быть, приближенно, оценены по формуле (12)

$$I_{\text{пр}(m)} = I_{\text{пр(макс)}} \exp(-\xi l_m), \quad (14)$$

где m – номер протектора; l_m – его расстояние от протектора с максимальным током; ξ – постоянная распространения.

Необходимо отметить, что ток протекторов, обусловленный действием блуждающих токов практически не зависит от параметров изолирующего покрытия трубопровода.

Приведенные данные показывают, что несколько первых анодов имеют близкие значения токов. Благодаря этому они растворятся в первую очередь. Их растворение, с одной стороны, приведет к увеличению скорости растворения следующих протекторов (за счет увеличения их токов), а с другой стороны, вызовет ухудшение коррозионного состояния металла в концевой зоне трубопровода за счет увеличения положительного смещения потенциала.

Резкое увеличение тока протекторов, приводящее к катастрофическому сокращению срока службы протекторов, не является единственным негативным следствием действия блуждающих токов. Другим таким следствием является ухудшение коррозионных условий в концевой зоне трубопровода даже при работающих протекторах. Для устранения отрицательных последствий действия блуждающих токов на трубопровод, оборудованный системой протекторов, целесообразно применить в концевых зонах систему катодной защиты. Основной задачей этой системы будет устранение концевых эффектов влияния блуждающих токов.

Технические средства мониторинга и электрохимической защиты трубопроводного транспорта

Известен значительный аппаратный задел различных фирм и предприятий для построения систем ЭХЗ. Здесь для определенности приведены ссылки на разработанные, изготовленные и введенные изделия фирмы ООО «ПАНТЕС».

Прибор для измерения параметров коррозии «КОРИП С-3 А» (ТУ 4217-003-54303725-2003, в дальнейшем – прибор) предназначен для определения коррозионного состояния и оценки эффективности средств ЭХЗ подземных металлических сооружений в полевых условиях и обработки информации на компьютере. Общей особенностью выполненных измерений является использование приборов в режиме синхронных измерений. С этой целью перед началом измерений выполнялась синхронизация приборных часов с часами компьютера. В результате выполнения этой операции показания приборных часов отличались не более чем на 1 с. При установке одинакового момента включения регистрации эта величина определяет точность синхронизации моментов измерений. Благодаря применению указанных регистраторов полученные данные о влиянии на участки тепловых трасс как блуждающих токов, так и работы установок катодной защиты смежных подземных сооружений обладают высокой достоверностью и, следовательно, доказательной силой. Полученные данные были использованы как исходные на стадии проектирования при оптимизации как расположения установок катодной защиты вдоль трасс нефтепроводов, так и выходных параметров этих установок.

В табл. 1 приведены описание объекта, средств, режимов и результатов для двух характерных вариантов коррозионных обследований. Целью первого варианта является общее коррозионное обследование заданного участка тепловой трассы, включая влияние импульсной компоненты блуждающих токов. Во втором варианте к этой задаче добавлена оценка влияния работы системы катодной защиты смежных подземных сооружений (газовой сети).

Таблица 1

Описание объекта, средств, режимов и результатов
для двух характерных вариантов коррозионных обследований

Описание объекта и цель измерений	Средства измерений	Схема и режим измерений	Результаты обработки данных
Участок трассы тепловой сети протяженностью 1,6 км; на участке 16 тепловых камер	Пять приборов КОРИПС, 15 измерительных электродов	Измерялись потенциалы «труба – земля» вблизи 5 тепловых камер, в которых к трубам подключались кабели от положительных клемм приборов. Вблизи каждой из этих камер размещались три измерительных электрода на расстояниях 5 м, 25 м и 50 м от камеры	Результаты измерений потенциалов электродами, расположенными на расстоянии 25 м от камер показывают: 1. Потенциалы на большинстве секций участка смещены в положительную сторону. 2. Значительное влияние импульсной составляющей блуждающих токов. 3. Характер влияния импульсной составляющей зависит от расположения точки на трассе: вблизи ТК-4 импульсы блуждающих токов вызывают анодное смещение потенциала, тогда как вблизи ТК-16 – ярко выраженное катодное смещение
Участок трассы тепловой сети протяженностью 0,95 км; на участке 12 тепловых камер	Пять приборов КОРИПС, 15 измерительных электродов	Измерялись потенциалы «труба – земля» вблизи четырех тепловых камер. Расположение измерительных электродов как в п. 1. Дополнительно были выполнены измерения напряженности электрического поля. Для оценки влияния установки катодной защиты производилось выключение ее питания программируемым прерывателем	Результаты измерений потенциалов электродами, расположенными на расстоянии 25 м от камер показывают: 1. Потенциалы на большинстве секций участка смещены в положительную сторону, за исключением ТК-39, участок вблизи которой защищен от коррозии благодаря действию установки катодной защиты на газопроводе. 2. Влияние импульсной составляющей наиболее значительно вблизи ТК-29. 3. В районе ТК-29 – ТК-33 работа установки катодной защиты вызывает смещение потенциала в направлении положительных значений, т.е. ухудшает коррозионное состояние трубопроводов

Общей особенностью выполненных измерений является использование регистраторов КОРИПС в режиме синхронных измерений.

Преобразователь защитного потенциала (ТУ 4217-002-54303725-2002) предназначен для постоянного мониторинга магистральных нефте- и газопроводов. Структурная схема преобразователя приведена на рис. 1.

Когда ключ коммутатора находится в положении 1, вспомогательный электрод (ВЭ) поляризуется (заряжается) потенциалом трубопровода. Затем ВЭ переключается к высокоомному входу аналого-цифрового преобразователя АЦП, и микропроцессор осуществляет измерение величины напряжения на ВЭ относительно медно-сульфатного электрода (МСЭ) как рабочей меры. Циклы измерения повторяются с периодом 1 мс (7 мс в положении 1, 4 мс – в положении 2). Отличительной особенностью преобразователя является отсутствие источника питания.

По мере решения этих задач возникают задачи интеграции процессов и ресурсов в проблемной области энергоэффективности.

Заключение

Предложенные в статье модели физических сред определяют не только статику, но и динамику их взаимодействия с трубопроводами в условиях воздействия внешних электромагнитных полей. Корректное упрощение таких моделей и приведение к виду «вход-выход» позволяет более точно осуществлять электрохимическую защиту трубопроводов и обеспечивать их безаварийность и продление ресурса. Модели приведены для подземных и подводных трубопроводов, но могут быть использованы и для других объектов – морских судов, нефтехранилищ, мостов и других металлических объектов. Приведены примеры технических средств для мониторинга и управления ЭХЗ. Показано, что развитие кибернетических методов, локальной автоматизации и появление технологических инноваций создали необходимые условия для постепенного перехода к интеллектуальным системам коррозионной защиты трубопроводного транспорта энергоносителей. Такой подход обеспечит новые возможности обеспечения качества процессов транспорта, переход к безлюдным технологиям и развития проблемной области ЭХЗ как части глобальной проблемы обеспечения энергоэффективности.

Список литературы

1. Киселев В. Г., Коршунов Г. И. Комплекс телеметрического контроля установок электрохимической (катодной) защиты КТК-1 // Монтажные и специальные работы в строительстве. 1999. № 3. С. 85–90.
2. Сольников Р. И. Вопросы построения замкнутой системы «природа-техногеника» // Известия «ЛЭТИ». 2009. № 7. С. 21–32.
3. Сольников Р. И., Коршунов Г. И. Математические модели систем управления «природа-техногеника» // Известия вузов. Приборостроение. 2012. № 12. С. 5–11.
4. Сольников Р. И., Коршунов Г. И. Системы управления «природа-техногеника». СПб. : Политехника, 2013.
5. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. М. : Наука, 1977.
6. Poliakov A. V., Korshunov G. I. Modeling of processes of electrochemical protection against corrosion of submarine pipelines under the influence of stray currents // SPb. Metalworking. Polytechnica. 2009. Vol. 3. P. 17–21.
7. Korshunov G. I., Frolova E. A. Systems analysis of physical processes: its application in the creation of cyber-physical systems // Lecture Notes in Networks and Systems. 2021. Vol. 184. P. 417–429.
8. Коршунов Г. И., Поляков А. В., Фролова Е. А. Математические модели процесса электрохимической защиты трубопроводных систем. СПб. : СПбГУ АП, 2005. 14 с.

References

1. Kiselev V.G., Korshunov G.I. Complex of telemetric control of electrochemical (cathodic) protection installations KTK-1. *Montazhnye i spetsial'nye raboty v stroitel'stve = Installation and special works in construction*. 1999;(3):85–90. (In Russ.)
2. Sol'nikov R.I. Questions of constructing a closed system "nature-technogenics". *Izvestiya «LETI» = Proceedings of "LETI"*. 2009;(7):21–32. (In Russ.)
3. Sol'nikov R.I., Korshunov G.I. Mathematical models of control systems "nature-technogenics". *Izvestiya vuzov. Priborostroenie = Proceedings of universities. Instrumentation*. 2012;(12):5–11. (In Russ.)
4. Sol'nikov R.I., Korshunov G.I. *Sistemy upravleniya «priroda-tekhnenika» = Control systems "nature-technogenics"*. Saint Petersburg: Politekhnik, 2013. (In Russ.)
5. Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. *Uravneniya matematicheskoy fiziki = Equations of mathematical physics*. Moscow: Nauka, 1977. (In Russ.)
6. Poliakov A.V., Korshunov G.I. Modeling of processes of electrochemical protection against corrosion of submarine pipelines under the influence of stray currents. *SPb. Metalworking. Polytechnica*. 2009;3:17–21.
7. Korshunov G.I., Frolova E.A. Systems analysis of physical processes: its application in the creation of cyber-physical systems. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2021;184:417–429.
8. Korshunov G.I., Polyakov A.V., Frolova E.A. *Matematicheskie modeli protsessa elektrokhimicheskoy zashchity truboprovodnykh sistem = Mathematical models of the electrochemical process protection of pipeline systems*. Saint Petersburg: SPbGU AP, 2005:14. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Геннадий Иванович Коршунов

доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67);
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)
E-mail: kgi@pantes.ru

Ремир Иосифович Сольницев

доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный
электротехнический университет «ЛЭТИ»
имени В. И. Ульянова (Ленина)
(Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Профессора Попова, 5)
E-mail: ssccte.leti@gmail.com

Елена Александровна Фролова

доктор технических наук, профессор,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67);
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)
E-mail: kgi@pantes.ru

Gennady I. Korshunov

Doctor of technical sciences, professor,
St. Petersburg State University
Aerospace Instrumentation
(67 Bolshaya Morskaya street, St. Petersburg, Russia);
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(29 Polytechnicheskaya street, St. Petersburg, Russia)

Remir I. Sol'nitsev

Doctor of technical sciences, professor,
St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI"
named after V.I. Ulyanov (Lenin)
(5 Professor Popov street, St. Petersburg, Russia)

Elena A. Frolova

Doctor of technical sciences, professor,
St. Petersburg State University
Aerospace Instrumentation
(67 Bolshaya Morskaya street, St. Petersburg, Russia);
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(29 Polytechnicheskaya street, St. Petersburg, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию / Received 29.05.2021

Поступила после рецензирования / Revised 30.06.2021

Принята к публикации / Accepted 14.09.2021

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

УДК 004.9, 007.2, 351.86, 614.8
doi:10.21685/2307-4205-2022-2-12

AN OVERVIEW OF THE REGIONAL SECURITY THEORY AND METHODOLOGICAL FOUNDATIONS

A.V. Masloboev

Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russia
a.masloboev@ksc.ru

Abstract. *Background.* The study is aimed at the development of theoretical and technical-organizational foundations for managing the safety and resilience of regional critical infrastructures. At the initial stage of our research, the analysis and positioning of the state-of-the-art theory of regional security among the existing fundamentals in the field of managing the development and functioning of complex dynamic systems are carried out. This is necessary for the subsequent enhancement of the formal apparatus used in modeling and automating the processes of ensuring the security of regional socio-economic systems and critical infrastructures of the region. *Materials and methods.* From the standpoints of a systems approach and the general principles of network-centric control, the methodological foundations of the theory of regional security as an independent and advanced field of knowledge are considered. The methodology of the regional security theory is built on the basis of well-known research areas: the stability theory, the reliability theory, risk management, the sensibility theory, the viability theory, the resilience theory and other scientific concepts that are ideologically complementary to the science of the security of socio-economic systems and develop it in goal-setting, missions, used methods and means. *Results and conclusions.* The range of regional security theory problems and its place among other scientific disciplines subject to the class of the object under study (regional socio-economic system), control modes and the impact nature of the external and internal factors are determined. At a qualitative level, ways are proposed to extend and adapt the developed theory of regional security to the problems of managing the resilience of regional critical infrastructures. The application substantiation of the considered regional security methodology for fully solving these problems is given.

Keywords: systems analysis, regional security theory, control, methodological foundations, stability, reliability, resilience, risk management

Acknowledgments: the work was carried out within the framework of the State Research Program of the Institute for Informatics and Mathematical Modeling (project No. FMEZ-2022-0023) and exploratory research of the Institute of North Industrial Ecology Problems of the Kola Science Centre of RAS.

For citation: Masloboev A.V. An overview of the regional security theory and methodological foundations. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(2):102–118. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-2-12

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕГИОНАЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ

А. В. Маслобоев

Кольский научный центр Российской академии наук, Апатиты, Россия
a.masloboev@ksc.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Работа направлена на разработку теоретических и организационно-технических основ управления безопасностью и жизнеспособностью региональных критических инфраструктур. На первом этапе исследований проводится анализ и позиционирование теории региональной безопасно-

сти среди существующих теоретических разработок в области управления развитием и функционированием сложных динамических систем. Это необходимо для последующего совершенствования формального аппарата, используемого при моделировании и автоматизации процессов обеспечения безопасности региональных социально-экономических систем и критических инфраструктур региона. *Материалы и методы.* С позиций системного подхода и общих принципов сетцентрического управления рассмотрены методологические основы теории региональной безопасности как самостоятельной и перспективной области знаний. Методология теории региональной безопасности построена на базе известных научных направлений: теории устойчивости, теории надежности, риск менеджмента, теории чувствительности, теории живучести, теории жизнеспособности и других концепций, идеологически комплементарных науке о безопасности социально-экономических систем и развивающих ее в целом. Задачами, используемых методах и средствах. *Результаты и выводы.* Определен круг проблем теории региональной безопасности и ее место среди других научных дисциплин с учетом класса исследуемого объекта (региональной социально-экономической системы), способов управления и характера воздействия внешних и внутренних факторов. На качественном уровне предложены пути расширения разрабатываемой теории региональной безопасности на задачи управления жизнеспособностью региональных критических инфраструктур. Дано обоснование применения методологии региональной безопасности к комплексному решению этих задач.

Ключевые слова: системный анализ, теория региональной безопасности, управление, методологические основы, устойчивость, надежность, жизнеспособность, риск-менеджмент

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания ИИММ КНЦ РАН (НИР № FMEZ-2022-0023) и поисковых исследований ИППЭС КНЦ РАН.

Для цитирования: Маслобоев А. В. Теоретические основы управления региональной безопасностью // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 2. С. 102–118. doi:10.21685/2307-4205-2022-2-12

Introduction

Regional security is a relatively young and promising research streamline in the security sciences making a significant contribution to the development of the state-of-the-art security theory of complex systems. However, the basic theoretical statements and approaches of this dynamically developing branch of knowledge still require in-depth study and analysis. The entire world research community, including the leading scientists of our country, is actively involved in problem-solving related to the development of the theory and methods of regional security management. Meanwhile, it should be mentioned that in practice many of these problems still remain not fully resolved. At the present stage of the country's development characterized by escalation, pressure, tension and uncertainty of the geopolitical situation in the world, ensuring regional security and resilience of the regional critical infrastructures is one of the foreground strategic tasks of the state, along with the organization of complex interdisciplinary research in this problem domain. Regional security is an important component in the country's national security system. The need to develop an integrated knowledge system in the field of regional security is stipulated by the emergence of new challenges under global threats growth: crisis phenomena in the world economy, international conflicts, global climate change, energy shortages, natural disasters, pandemics, etc. As a result, all that requires the development of theoretical and technical-organizational foundations for regional security ensuring and support, scientifically grounded methods and tools for management problem-solving of risk and security of the regional critical infrastructures, as well as new technologies built on their basis and applicable in practice to maintain the resilience of various categories critical facilities of the region under the impact of internal and external threats of various nature and scale.

It must be admitted that there is still no unified theory of regional security generalized for various fields of economic activity and branches of knowledge (humanitarian, natural and technical sciences). The scientific and technical literature is mainly dominated by verbal representations on the regional security as a field of research, along with strict formalized definitions, which are practically missed. It is well known from practice that the security problem agenda of the regional system functioning is directly related to the parameters variation of system state as a result of the impact of negative internal or external factors on the system elements. That leads to the initiation of crisis phenomena and emergence situations. Thus, regional security ensuring is not possible without the stability and controllability analysis of critical facilities and infrastructures of the region. At the same time, the violation of regional security is in theoretical terms determined by the state transition dynamics of the socio-economic system or its individual critical elements from a state of stability to an unstable state.

Sustainable development and regional security are interconnected to each other: the lower the tension is in the social sphere, the higher the environmental sustainability and efficiency of the economy are, than the higher the life quality of the region population and the level of its security are, and the more perfect the system of regional security ensuring is, than the more stable the all critical facilities, processes and infra-

structures operates. Then the principle and formula of "regional security ensuring via sustainable development" can be reasonable used as a basis for developing and implementing the security management methodology of the regional socio-economic systems.

The concept of "regional security" is quite clearly defined and formalized in [1]. In general, regional security is understood as such a protectability state of the regional socio-economic system when the impact of external and internal factors does not lead to deterioration or impossibility of system functioning and development. This definition is considered well acceptable, but needs some minor clarification. Since the given definition of regional security interprets it through the system (region) state, which is specified by a set of parameter values of the system elements fixed at some instant, in the most general form the regional security ensuring expects the arrangement of favorable conditions when the impact of external and internal factors does not lead to the state parameters deterioration of the critical elements of regional system or to the impossibility of their functioning and development.

The objective of this study is analysis and positioning the theory of regional security among the existing theoretical evidence in the field of development and functioning management of the complex dynamic systems. This is necessary both to identify the specific features of the theory of regional security and determine the classes of problems solved by methods characteristic to this theory, and to improve the mathematical apparatus used in modeling and automating the processes of security ensuring of regional socio-economic systems and critical infrastructures of the region.

The work has a traditional structure and consists of two main. In the first section, from the standpoint of a systems approach, the methodological foundations of the theory of regional security and its place among the related research concepts: stability theory, reliability theory, control theory, risk management, sensitivity theory, survivability theory, resilience theory that are ideologically complementary to the security science of the socio-economic systems and developing it in goal-setting, scope, agenda, methods and tools used, are considered. The second section is debatable and touches upon general issues of extending the methodology of regional security to the management problems of the regional critical infrastructure resilience, as well as the basic principles of the system engineering theory and practice for regional security ensuring under the impact of external and internal disturbances on the controlled object (infrastructure).

Background

Historically, the need to ensure the protectability of socio-economic systems from various types of threats and the prospect of the science of regional security have always existed throughout the entire period of research on the security problems and issues of society and the state. However, regional security as an independent research guideline was arisen and come out in progress relatively not long ago. At present, the theory of regional security is an interdisciplinary knowledge system on methods and approaches to protection and resilience support of the regional socio-economic systems. Despite the seemingly applied orientation of this doctrine *prima facie*, regional security, as a scientific discipline, has a high predictive value and usefulness for solving new, sometimes unexpected and non-standard problems that origin within the management process of the risk-sustainable development of regional socio-economic systems. This discipline is supported by well-known theoretical laws and systematized empirical facts on the nature of threats and dangers, operates with its own categories and abstractions, contains axioms and theorems, has a logically built methodology for analysis and counteraction the negative trends. According to the National Security Strategy of the Russian Federation [2], the public policy in the field of regional security ensuring is carried out in three main areas:

- 1) problem monitoring and threat prevention of emergency and crisis situations initiation in the regions, the implementation of anti-crisis measures appropriate to the situation;
- 2) scenario analysis, forecasting and mitigation of the security violation risks of regional critical infrastructures;
- 3) system development and enhancement of the distributed situational centers at the regional level for a comprehensive problem-solving of security ensuring and evaluating of critical facilities of the region, as well as efficiency enhancement of public administration in this area.

These problem-solving in practice is impossible without a deep insight of the theoretical foundations, principles and approaches on which the modern theory of regional security is based. Thus, the essential impact on fundamental development of the theory of regional security in the formation and key ideas generation phase was made by such universally recognized and established scientific conceptions as the general system theory and system analysis, control theory, decision theory, risk theory, catastrophe theory, stability theory, reliability theory, survivability theory, probability theory, operations research, sensitivity theory and many other disciplines that are in some way related and similar to security in terms of goal setting and missions. The most common problems that unite these theories cover the following: modeling and analysis of

the behavior of complex dynamic systems (socio-economic, natural-industrial, technical, cyber-physical, etc.) under uncertainty on mathematical models; studying the characteristics dynamics of the complex objects that are under the influence of internal and external factors (disturbances) and determine the structural integrity, functionality and resilience of these systems; development of mechanisms for stabilizing dynamic systems and the processes running in it under conditions of critical situations emergence and loss of stability; synthesis of regulators – systems for stability and protectability control of complex objects in the process of influencing their functioning by multiple threats under various development scenarios of the adverse events, object behavior and modes of operation of these objects.

The problems-solving stated above is based on the application of a systems approach, which also underlies all the listed above research concepts, ideologically adjacent to the security theory. The systems approach allows visually representing and modeling the structure of critical facilities, critical infrastructures and security support systems, conducting system functional decomposition, defining behavior mechanisms and patterns of system elements and specificities of their interaction, describing input and output influences and the nature of the external environment, identifying the trends in system operation, as well as assessing both the relevance of goals and action chains to achieve them and the adequacy analysis of chosen system control algorithms subject to hypotheses suggested and modeling objectives assigned. Using the methods of system analysis, it is possible to establish, how the system components behavior differs from the system as a whole (e.g. when the system elements function stably, but at the same time the system itself is unstable, or otherwise). Another situation is typical for the class of macrosystems [3] such as regional socio-economic systems, when an object (system) has a deterministic type of behavior, and its subsystems operate in some non-deterministic way. These features emphasize the applied value of the systems approach using for the management problem-solving of the macrosystem security and in the theory of regional security. Examples of studying various aspects of regional security based on the methods of system analysis, cybernetics and operations research are given in [4-9].

Then, let us consider the methodological basis of the theory of regional security and its relationship with congenial research concepts, on the major ideas and statements of which it is built. Thereto, let us analyze and examine the conceptual model of the regional socio-economic system, presented in the form of a black box and including critical infrastructures and critical facilities (Fig. 1), which are significant in respect to ensuring the security and resilience of this macrosystem.

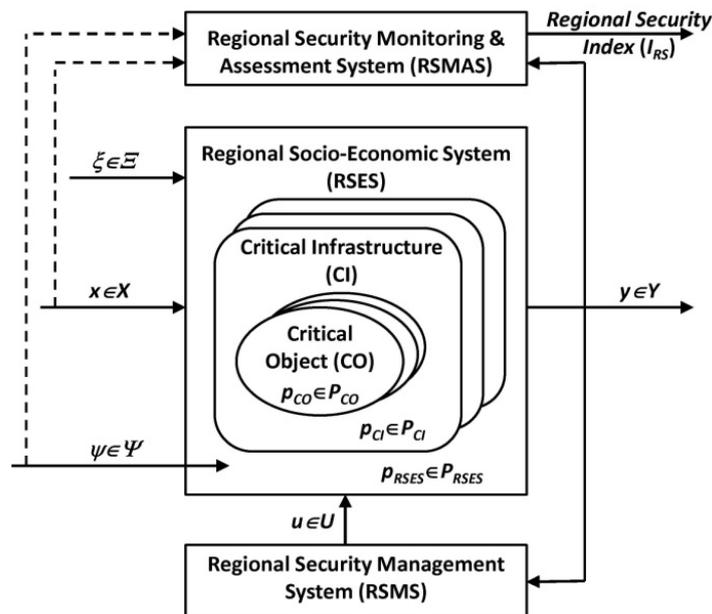


Fig. 1. Conceptual model of the regional socio-economic system (macrosystem) with a view to managing and ensuring regional security

According to the study [10], such a model in operator form can be formally defined as follows:

$$CM_{RSES} : X \times \Xi \times U \times P \times \Psi \times [0, T] \rightarrow Y, \quad (1)$$

where $x \in X$ is a set of identifiable input actions (impacts of the external environment on the system); $\xi \in \Xi$ is a set of the environment parametric disturbances, i.e. the external random influences such as

threats and dangers; $u \in U$ is a set of control actions (crisis-proof or protective measures) generated by the security management system (regulator) and aimed at the regional system stabilization under parametric disturbances via implementing an appropriate control algorithm (program); $p \in P$ is a set of structural parameters of the system (critical facilities and regional critical infrastructures); $\psi \in \Psi$ is a set of internal threats and dangers; $[0, T]$ is a action period of the system; $y \in Y$ is a set of state variables of the regional system that determine the trajectory of dynamic system in the security domain at the development cycle $[0, T]$; « \times » is a sign of the Cartesian product.

Internal and external actions (threats) are implementing through certain known functions $p = p(\psi)$, $x = x(\xi)$ and impact on the system behavior by destabilizing actuation and changing the system parameters $p \in P$ and input variables $x \in X$, respectively. Then, using differential form of model specification, if acceptably, the system model (1) can be presented of the form:

$$\dot{y} = f(x(\xi), u, p(\psi), y, t), \tag{2}$$

where f is a known vector-function; $x(\xi), u, p(\psi), y$ are vectors of the sets X, U, P, Y , respectively, with entry conditions $y(t_0) = y_0$.

The mathematical apparatus of sensitivity theory [11] can be in attempt effectively used to formalize the concepts of threat and danger. Following [12], external and internal impacts on the dynamic system's behavior are formalized in an analytical form as follows. Let a critical object of the region or a regional critical infrastructure be formally defined in the following differential form:

$$\dot{y} = f(y, p(t), t), y(t_0) = y_0,$$

where $\bar{y} \in Y$ is a n -dimensional state vector of system parameters; $p(t)$ is a m -dimensional vector of system parameters with rating value $p = p_0$; f is a vector-function; t is operating time.

System parameters $\bar{p} \in P$ depend on time. Therefore, the identified input actions are considered as the known functions and refer to among these parameters also.

If the function f assumes Taylor expansion in the neighborhood of point $p = p_0$:

$$y(t, p) = y(t, p_0) + \frac{\delta y(t, p)}{\delta p} \Big|_{p=p_0} (p - p_0) + \dots,$$

then the form $\frac{\delta y(t, p)}{\delta p} \Big|_{p=p_0}$ is a sensitivity vector of the n -component state vector $\bar{y} \in Y$ with respect to $\bar{p} \in P$.

When considering external $\bar{\xi} \in \Xi$ and internal $\bar{\psi} \in \Psi$ impacts as the parameters $\bar{p} \in P$ that exert influence on the sensitivity of state variables $\bar{y} \in Y$ of the regional socio-economic system, its critical infrastructures or individual objects, then these impacts (threats) are potentially dangerous, and the concepts of external and internal threats can be formalized in the following form:

$$\exists \xi_i \in \Xi : \left| \frac{\delta y(t, \xi_i)}{\delta \xi_i} \right|_{\xi_i = \xi_{i,0}} > 0, \quad i = \overline{1, K}, \quad \exists \psi_j \in \Psi : \left| \frac{\delta y(t, \psi_j)}{\delta \psi_j} \right|_{\psi_j = \psi_{j,0}} > 0, \quad j = \overline{1, L}.$$

The study [12] proves that the form $s(t) = \frac{\delta y(t, p)}{\delta p} \Big|_{p=p_0}$ satisfies a vector differential equation:

$$\dot{s} = \left[\frac{\delta f(y, p_0, t)}{\delta y} \right] s \Big|_{y=\bar{y}} + \frac{\delta f(\bar{y}, p, t)}{\delta p} \Big|_{p=p_0}, \tag{3}$$

where $\bar{y} = y(t, p_0)$ and $s(0) = \frac{\delta y_0}{\delta p} \Big|_{p=p_0}$.

The solution of equation (3) allows to analysis the sensitivity indices dynamics of the system and estimate the feasibility of potential threat implementation, i.e. the hazard occurrence.

The problem of identifying a set of adverse combinations $\Pi \subset \Xi \times \Psi$ of the internal $\psi_j \in \Psi$ and external $\xi_i \in \Xi$ impacts, initiating critical situations in the system, has the most concrete practical interest for the researchers and security system developers. As a rule, the given critical combinations of the $\psi_j \in \Psi$ and $\xi_i \in \Xi$ impact chains are assigned and identified under simulation experiments on system model or composite models of independent system components.

The completeness of the conceptual model (1)-(2) is limited only by information on the system and the processes occurring in it, available to the security control actors at the time of decision-making, and is adequate within the framework of the assumptions made on the behavior manner of the security objects, their attributes and parameters. Model (1)-(2) can be used to estimate the causes of unstable behavior and the stability limits of the system and its elements, in particular, at the initial phases of the development life-cycle of regional crisis situations (namely the emergence and activation of threats and dangers) [13]. However, this model does not deal with all other phases of the life-cycle (development, penetration, impact, regeneration) and is not able to embrace all modes of system functioning: normal, emergency (crisis reaction) and post-emergency (elimination of consequences). At the same time, in these modes and at other phases of the threat life-cycle of regional security, the information on behavior of the system and its elements can be obtained in the course of running series of simulation experiments with composite computer models built on the basis of the conceptual model (1)-(2) and its extensions. Thus, the formal analysis and substantiation of the security of a regional system using model (1)-(2) is carried out by dynamic modeling of interaction of the system elements with the external environment in time and under the influence of control, internal and external disturbances.

The principal components of the security of regional socio-economic systems are stability, controllability, observability, reliability and survivability.

Talking about the analysis of system stability, the conceptual model (1)-(2) allows obtaining a family of phase trajectories characteristic to the system subject to the entry conditions values $y(t_0) = y_0$, type and level of internal $\psi \in \Psi$ and external $\xi \in \Xi$ influences and their combinations. The stability theory statements [14] are widely used in problem-solving of regional security, since it allows discovering the causes of fluctuations in the system behavior occurring as a result of the multiple threats implementation of various natures.

From the standpoint of this theory application, the problem-solving of ensuring regional security comes down to stability delimiting of the regional socio-economic system. Overrunning these stability limits means that the system or its backbone elements lose dynamic balance due to the influence of negative factors on them (the development of disproportions and dysfunctions within the system, the entropy increment, external impacts, the destruction of internal connections, defect accumulation, etc.), i.e. the system transition from an equilibrium state to a critical one, in which the system resilience, its structural integrity or functionality may be violated.

In terms of stability theory, regional security is defined as such a protective attribute of the socio-economic system called self-preservation, when a set of preventive anti-crisis measures is implemented under the impact of internal and external threats that are uncertain in composition, type and level on its critical elements. In an effort to ensure and support system self-preservation, these protective actions provide sufficient remoteness of the system balance states and development trajectories from critical situations with a given margin of safety (survivability).

The stability theory is extremely useful and urgent for the general understanding of regional security theory, its scope, purposes and the range of problems it solves. Thus, classical studies in the field of stability theory [14] examine balance states of complex systems and carry out analysis of system dynamics in a small neighborhood of these states. Herein, the stability problems in case, when the system development is a result of external environment factors changing and not the system itself, are solved. Studying the nature of arising disturbances in the initial system state or at its primary input, is especially urgent to the protection of critical facilities of the regional systems. State-of-the-art studies on stability theory [14] are vice versa focused on structural stability [15] and "coarse systems" [16]. These research works examine perturbations in the system structure itself and consider problem-solving of qualitative changes identification in system functioning trajectories in case of violations of the system structure (parameters) itself. Hence, the stability theory makes it possible to estimate the behavior changes dynamics of socio-economic system (phase trajectories) under emergence of multi-type critical situations and various random events in the context of system normal functioning, as well as to determine the nature, conditions and mechanism of system transition to an emergency operating mode, when adverse or unknown events occur.

The further ideological development of the structural stability conception is the theory of bifurcations [17, 18] and the theory of catastrophes [19, 20] based on it. Bifurcation theory studies qualitative changes in the dynamics of system behavior that are sensitive to some of their parameters under an infinitesimal variation in these parameters, i.e. it examines the nature of system equilibrium positions in the phase space when these parameters change. Thereto, the methods of perturbation theory are used [21]. The system parameters, the change of which leads to a situation of bifurcation, are called bifurcation points. Catastrophe theory also studies the conditions under which there is a abrupt qualitative change in the dynamic system attributes as a result of a uniform quantitative change of its parameters on which it depends. On the basis of catastrophe theory methods, the critical domains of system parameters, that cause the initial system position transition in the equilibrium state space (changing of stability attraction domains), are determined.

Certain difficulties in the process of system analysis for stability arise when finding all points characterizing the system equilibrium states, and when constructing all possible system behavior trajectories in the neighborhood of these points over an infinite time interval. These problems may have rather high dimension and computational complexity. To simplify the solving method of these problems, ad hoc frequency, matrix and integral stability criteria are applied [14], which are also suitable for analyzing the risk-sustainable development of regional socio-economic systems for security and resilience. At once, the issues of studying the practical stability of regional socio-economic systems deserve special attention in terms of assessing the permissible limits of the macrosystem trajectories on a finite time interval [3, 5], as well as identifying the prerequisites for the unstable system behavior due to spontaneous or unforeseen failure of its critical elements.

The system controllability is essentially similar to the reachability concept and characterizes the possibility of achieving the control objective, which is fixed in the system state parameters. From the system controllability point of view, the application of control theory [8, 22-24] in the problem-solving of regional security ensuring pursues generation and maintenance of conditions for the system dynamic equilibrium, since the system utility function reaches its maximum only in the domain of stable states.

The traditional approach to problem-solving of socio-economic system stabilization under conditions of parametric disturbances (internal and external threats) using control theory methods [8] lie in the application of control action function $u(t)$ within the framework of model (1)-(2) and engineering the regional security management system of the "object – regulator" type. Thereto, three typical classical control circuits, which are considered in detail in [25] and shown in Fig. 2, are used. There are (a) closed-loop, (b) open-loop and (c) combined control schemes, differing in the principles of control implementation: "by disturbance" and "by deviation".

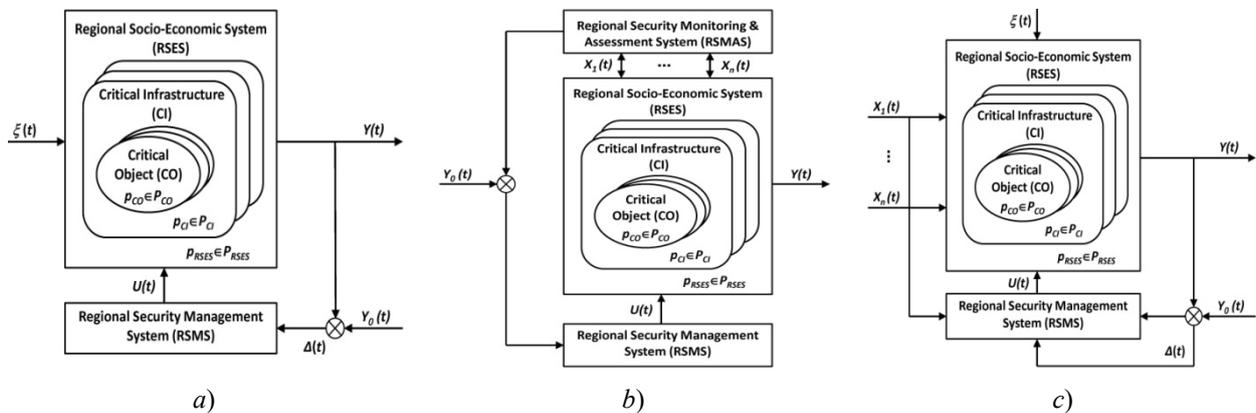


Fig. 2. The engineering circuit diagrams of the regional security control systems: a – closed-loop; b – open loop; c – combined

Key symbols in Fig. 2: $X_i(t), i = \overline{1, n}$ is a set of identifiable (measured) external disturbances (threats); $U(t)$ is a set of control actions generated by the regulator according to a certain program (control law) and compensating for the negative impact of external disturbances; $\Delta(t)$ is a deviation of state variables $Y(t)$ from the given values $Y_0(t)$; $\xi(t)$ is a set of random nature parametric disturbances of the external environment.

The synthesis of regulators for managing complex socio-economic objects and systems is a laborious multi-aspect problem in the development of integrated automated systems for control of regional security and ensuring of critical infrastructure resilience. For the theory and practice of regional security, of particular interest is a problem of finding and substantiating universal feedback control laws that guarantee the

stability of functioning in the chosen development cycle, the global stability and adaptability of regional macrosystems under any limited disturbances and impacts, regardless of their nature and scale.

In the practice of engineering and organizing regional security support systems, along with the fundamental ideas of control theory [26], methods of reliability theory [27, 28] are also used, aimed at operational reliability enhancement of critical facilities and infrastructures of the region. It is terminologically known that the concepts of security and reliability are not similar, since security is a system status when there are no negative impacts on the system elements or on other objects that are in the system operation environment. Meanwhile, reliability is a system status when, over a selected time interval, the system is able to perform its predefined functions in the specified modes and operating conditions while retention the values of all operating technological parameters, quality indices and dynamic characteristics within these permissible limits.

Traditionally in practice, methods of probability theory and mathematical statistics are used to reliability indices estimation of the system [29]. This is stipulated by the fact that the events characterizing the quantitative and qualitative reliability indices are random in nature. The system state is assigned by a multi-dimensional point y in the phase space Y , and the y state transition in time is defined by a random process $y(t)$. The subset of critical states $Y_c \subseteq Y$ that correspond to the failure occurrence is allocated in the phase space Y . Such failures initiate critical situations that are characterized by a gradual or sudden loss of system performance and functionality as a result of band fault, when system parameters overrunning the admitted region due to the impact of internal and external factors (threats). Thus, using the methods of reliability theory (e.g. the "event trees" or "failure trees" techniques), the estimation of the regional security level is derived through the emergence probability of critical situations at the facilities and infrastructures of the region and involves indentifying the set of infeasible values of the critical element parameters of the regional system and the vector of its phase coordinates that are unacceptable in respect to the functioning and development of the system.

The probabilistic approach to risk assessment of the critical situations (failures) emergence undoubtedly draws the theory of reliability closer to the theory of regional security when carrying out a probabilistic scenario analysis of the system unstable behavior characteristics. However, there are some limitations in application of the reliability theory to problem-solving of regional security ensuring. Firstly, for the probabilistic interpretation of risks and critical situations, a presence of the mass character of homogeneous events is important, while for the theory of regional security this is not always reachable, since regional crisis situations, like sources of threats, are heterogeneous by their nature and do not always emerge in statistically uniform conditions. Therefore, the probability statistical interpretation is not always applicable to the set of such events. Secondly, the theory of reliability was mainly focused on the failure analysis of complex technical systems from its origins, whereas failures of individual elements of the socio-economic systems do not lead to violation of the entire system functioning as a rule. At the same time, socio-economic systems require taking into account the active influence of the controlled system on the security management process and are characterized by a variety of macro-states such as dynamic equilibrium, sustainable development, transient phenomenon (bifurcation), crisis, absorption, adaptation to changes, recovery and others. At the same time, attempts to take into account the human factor are also made in the modern theory of reliability [5] on the basis of the well-known methods – on-line monitoring, precaution, preventive-treatment and diagnostics of complex socio-technical systems.

Despite the considered limitations, it is worth to mention that the relationship between the theory of reliability and the theory of regional security is quite obvious. Reliability theory explores the whole set of probable states of the system functioning: normal (stable), limiting, critical (emergency) and other types. The criteria for these states are regulated by technological normative, operational and experimental-design documentation. In turn, the theory of regional security, from the standpoint of acceptable risk, studies ways to minimize and mitigate the consequences (damages and losses) from the impact of potential threats and hazards on critical facilities and regional critical infrastructures located directly in the space of these states and having their own stability limits and security domains. However, not all objects of the theory of regional security have a developed legal framework and security certificates have been designed that establish the modes and requirements for performance and operation of these objects. The security certification of critical facilities and regional critical infrastructures is an independent applied problem and needs detailed scientific substantiation and consideration. Thus, the goals of the reliability theory and the theory of regional security coincide in maintaining the system resilience and retention its performance at the lowest cost, damage and loss in conditions of both stable and critical situations.

The concept of survivability [30, 31] is fundamentally different from the reliability theory. The survivability of socio-economic systems takes into consideration a wider range of destabilizing factors, the accumulation of internal dangers (e.g. structural changes) leading to fatigue, aging and subsequent degrada-

tion of system elements, and global threats from the external environment (crisis phenomena in the global economy, natural disasters, military-political international conflicts, etc.). The survivability of socio-economic systems is often understood as the conservation property of the full or partial performance of critical system elements under the influence of destabilizing factors on them, which ensures the structural integrity and connectivity of system elements with the minimum tolerable loss of system controllability and performance quality, as well as the possibility of system functions recovery.

Unlike security and reliability, the attribute of system survivability is actually considered in relation to the entire system and not to its components individually. Meanwhile, the methods of the survivability theory should ensure that the system fulfills its goals, functions and tasks under the influence of negative factors, and not support its full recovery after the threats are implemented. A system that possesses survivability attribute is capable, first of all, to respond to threats and seeks to mitigate (eliminate) the consequences of destabilizing impacts until the moment of complete failure of the system operation, regardless of the deterioration in the performance of the system elements.

Thus, the survivability of socio-economic systems, as a component of regional security, should be achieved not only through higher state of readiness and protection of critical facilities and infrastructures of the region (timely detection of potential hazards and implementation of preventive anti-crisis measures), but also through mechanisms for recovering and adapting the system to new operating conditions in the process of counteracting multiple threats.

A modern version of the survivability theory is the dynamically developing mainstream conception of socio-technical, cyber-physical and organizational system resilience [32]. Currently, this novel concept is popular mainly abroad. Meanwhile, as shown in [33-34], this is a relatively new research direction in the domestic science, which can be positioned as a logical continuation (evolution) of the ideas and postulates of the general theory of security of complex socio-economic objects and systems at the present stage of development of the risk and security sciences.

Results and Discussion

The theory of regional security as a science of protectability and resilience of the regional level socio-economic systems is based on the following main statements and conditions. The theory of regional security uses its own mathematical and conceptual-categorical apparatus developed on the basis of research concepts discussed in the previous section of the work and taking into account the specificity of objects and problems being solved in the field of regional socio-economic system management. To these problem-solving, the regional security theory encapsulates the entire arsenal of methods and tools used by scientific disciplines adjacent in goal-setting and phenomenology. In particular, the methodology of regional security is based on the concept of "acceptable risk" [5] and the principles of sustainable development [1], which allow systemic examination and definition of the concepts of risk, threat, hazard, damage and losses in resilience management of socio-economic systems from a unified position.

Since the occurrence of emergency and crisis situations in various areas of socio-economic system development is an imminent objective reality, the theory of regional security should operate with model toolset that provide the possibility of scenario analysis and forecasting of the behavior dynamics of critical facilities of the region under the impact of multiple threats. In this case, risk assessment, identification of trends, mechanisms and patterns is carried out using the methods of simulation, cognitive, logical-probabilistic and fuzzy modeling, as well as expert methods. In terms of minimizing the consequences of threat implementation, such an approach in the theory and practice of regional security management provides the principle of "anticipate – prevent – adapt", which is relevant to the research objectives in this subject domain. Based on this approach, not only the problems of risk assessment and prediction of the critical situations are solved, but also the problems of identifying sources of hazards, analyzing scenarios for the possible behavior of critical facilities, estimating their stability limits and impact tolerance to external and internal disturbances (threats), organizing or configuring (optimizing) the streamlined security systems, formation of an information structure for making managerial decisions.

A distinctive feature of regional security studies is the need to solve multi-objective optimization problems with stochastic or fuzzy target (criterion) functions under deterministic, probabilistic or fuzzy constraints in the context of data incompleteness on the origination causes and development dynamics of the regional crisis situations. An example of such a problem can be mentioned the estimation of the optimal configuration of program-technical assets (decision support system) of the regional situational center or the efficiency evaluation of the control program (project) of comprehensive security for the groups of critical facilities by regional economy sectors taking into account the costs of protection measures and current legislation.

A special place in the methodology of regional security is assigned to expert evaluation of random threats and dangers operating in a latent, background or active manner within the critical domains of the re-

gional socio-economic system functioning, since the sources and nature of hazard manifestation are not known in advance as a rule. At the same time, in some cases, the subjectivity of experts and judgement methods in the anticipation of adverse events may negatively affect the quality of prevention of the critical situation development and be accompanied by additional costs for goal-oriented planning and implementation of measures to security ensuring and support of the regional critical infrastructures and their elements.

From a methodological point of view, the theory of regional security corresponds a body of scientific knowledge, mechanisms and laws, methods and principles, terms and definitions in the field of risk and security management of complex systems that provide estimation of protectability criteria and indices of the regional socio-economic systems at the quantitative and qualitative level, studying the behavioral trends of this class of systems in the threat life-cycle of regional security, conducting the scenario analysis and forecasting of the regional crisis situations development, synthesis the comprehensive programs for situational management of the critical facilities security in the region and the regional critical infrastructures resilience. In a generalized form, the proposed methodology of regional security is schematically represented in Fig. 3.

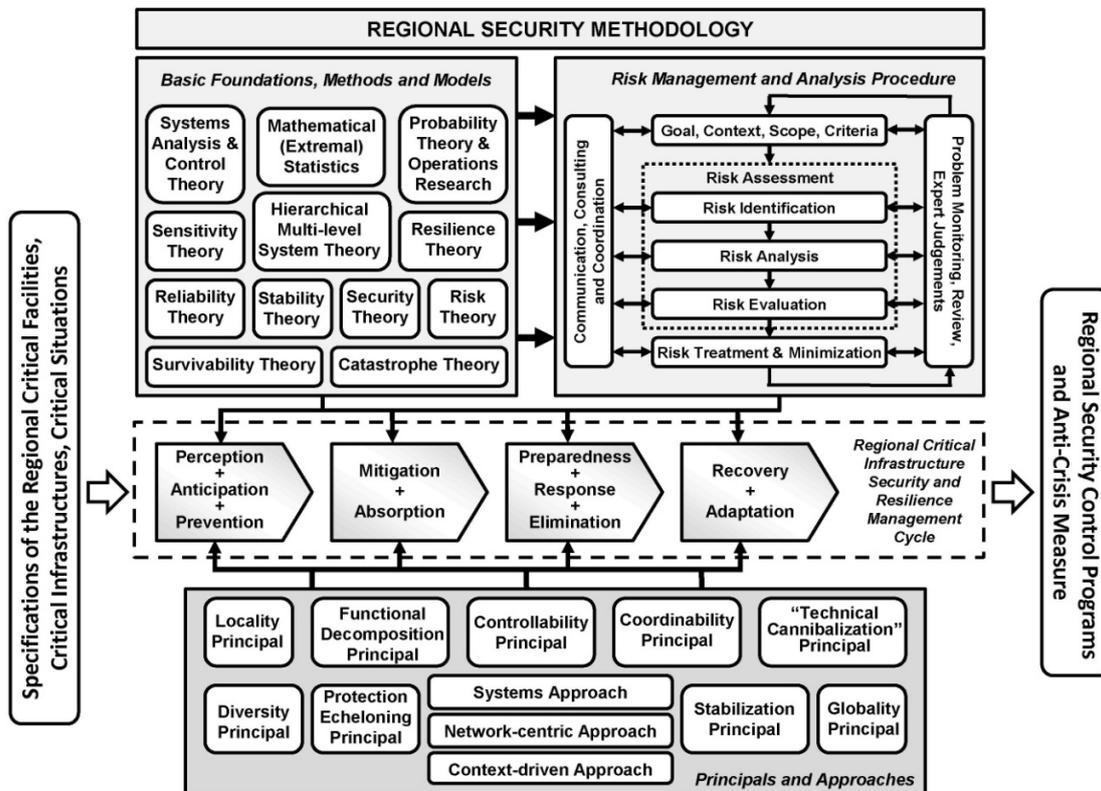


Fig. 3. The unified methodological base (methodology) of the theory of regional security

Let us state the basic principles of organizing security systems that underlie the theory and methodology of regional security (Fig. 3):

1. *The principle of locality.* This principle consists in parrying and localizing possible threats and hazards at the initial phase of their inception (before diffusion) by arranging special conditions that prevent the emergence and spreading of negative factors and trends and that are beneficial from an economic point of view at the same time. This principle is applied once or repeatedly subject to the specificity of problem statement to be solved on regional security ensuring.

2. *The principle of globality.* This principle consists in a broader multi-level organization of regional security management and is implemented in cases when the principle of locality is violated or the application of the latter is not efficient enough. This principle is a superstructure over the principle of locality and is designed to support favorable conditions for the system (region) existence and functioning under emergence of the global threats by streamlining and regulating the interaction between elements of the regional socio-economic system and the external environment.

3. *The principle of functional decomposition.* The application of this principle expects the implementation of two protective mechanisms (special measures built according to the systems concept): an internal mechanism for security ensuring of the region integrated into critical areas of regional socio-economic sys-

tem and an external mechanism for counteracting the security threats. The external protection mechanism implements models and methods that provide acceptable conditions for the normal functioning and progressive development of the regional system, i.e. the minimum permissible level of impact on the system of negative factors leading to the deviation of regional security indices from the standard values. The external security ensuring mechanism is aimed at achieving a protectability state of the regional system under the impact of multiple threats and their penetration into critical facilities and infrastructure of the region. The internal protection mechanism provides parrying and localization of internal security threats (structural transformations and disturbances generated by the system elements as a result of their self-organization), as well as external security threats (impacts produced by the environment and overcoming the external protective mechanism). In other words, the internal security ensuring mechanism is focused by its measures on maintaining the dynamic balance of the system elements (systemic homeostasis) and retention their critical parameters in the security domain by means of self-regulation and adaptation of the system. The use of the principle based on the considered protection mechanisms in the theory of regional security provides the major in-depth analysis of the origination nature of the internal and external threats, as well as recognizing and distinguishing between them when solving the problems of security control of regional socio-economic systems.

4. *The principle of stabilization.* This principle can be considered in respect both to the system we are examining and to a specific situation in the interaction of individual system elements with each other and with the external environment under the actuation of parametric disturbances. Regional socio-economic systems belong to the class of complex developing purposeful systems, the structure and functions of which change over time. Meanwhile, from the standpoint of general theory of systems and control theory, in the process of these system stability analysis over a certain fixed time interval, such systems can be considered as stabilizer systems of the "object – regulator" type owing to the presence of controls that counteract internal and external disturbances. Then the problems of the theory of regional security become the problems of stabilization. The principle of stabilization involves the implementation of a set of measures to preserve and process the system in the space of stable states (security domains), the observed characteristics of which can dynamically change and predetermine the manner of system behavior under critical conditions. As a rule, in practice, one has to deal with several, functionally related security domains in the state space of regional systems, corresponding to a variety of sources and channels of threat initialization in these systems.

As a regulator to compensate for disturbances, control mechanisms are used that ensure the formation of favorable conditions for the purposeful behavior of the control object (regional socio-economic system). Following [10], there are: "rigid" institutional management through the control of restrictions and norms of activity (control coordination at the metalevel); "soft" motivational management through changing the utility functions and preferences of control actors by introducing a system of penalties and rewards for choosing certain actions (stimulating the activities of actors); "flexible" information management through the change of control information structure (situational awareness), which is operated by the control actors in the process of preparing and generating decisions (decision-making information-analytical support appropriate to the situation). Violation of the system stability leads to malfunctions and collisions in its functioning, due to the development of critical situations and random processes, which in fact may not be amenable to compensating control actions (correcting signals).

5. The principle of controllability. This principle characterizes the set goal achievement by the regional security support system. As is known from practice, to implement this principle it is necessary that the security authorities of the region have the opportunity to purposefully influence on the state parameters of critical facilities and infrastructures of the regional system, as well as that the resource supply of the management process is sufficient to problem-solving on the way to the system goal and appropriate for it. At once, in order to implement system control, the system observability requirements must be met, which ensure the receipt and access to information on the system state. Thereto, tools for state monitoring and identification of the regional socio-economic system development are being designed. For nonlinear dynamic systems, the terms of controllability and control conditions are associated with great difficulties, while for linear systems it is known.

6. *The principle of echeloning protection.* This principle is based on the network-centric approach [10] and the implementation of the "in-depth" security ensuring mechanism by means of the deployment of the multi-level distributed security control systems of the region. Examples of such a network security infrastructure at the federal and regional levels are systems of distributed situational centers and regional management centers [35], respectively. The network is large-scale, there are many decisive centers, and each node (security manager or decision-maker) needs to be provided with information exactly corresponding to the current situation in order to coordinate managerial decisions and joint actions. Substantially, the principle of network-centricity in the theory of regional security implies the implementation of a fully or partially decentralized structure of security organizational management of the critical facilities in the region

with dedicated control centers, the interaction between which is carried out on the basis of their integration into a unified regional information space. Control centers perform the major functions of monitoring, preventive analysis, filtering and auditing of risks associated with a security violation of the regional critical infrastructures functioning, and on the basis of adverse event forecasts, it generates anti-crisis measures to minimize the possible consequences of the threat implementation in each domain of regional security and ensure an acceptable risk level of critical facilities protectability in the region.

7. *The principle of coordinability.* In the theory of regional security, this principle is implemented by controlling the restrictions on management. By this method of negotiation, the principles of coordination of the interactions and quality functions, as well as the postulate of compatibility of problems solved by the system elements with respect to the general problem of the system, must be fulfilled. Coordination is understood as the achievement of consistency in the operation of all system units by rational interfacing them that ensures obtaining the optimal solution to the general problem of the system under optimization the subproblems solved by the subsystems. The system is coordinated if there is a coordinating signal that ensures the consistency of the interfacing inputs and the consistency of the expected and actual values of local objective functions, respectively.

8. *The principle of diverse actuation (diversity).* The principle of diverse actuation security (protection) is one of the central ones in the theory of regional security and is implemented both at the object (local diverse actuation) and infrastructural (global diverse actuation) levels of regional socio-economic system organization. This principle is generally aimed at the rational combination and allocation of various types of resources and support tools to security ensuring at different levels of situational control of the region. This is necessary to reduce the disfunction probability (risk) of the group of critical facilities due to a common cause. When engineering regional security support systems, this principle implies the availability and actuation of the multi-version redundancy mechanisms (generation of two or more redundant systems) that optimize the functioning of critical facilities according to the criteria "reliability – cost" or "security (acceptable risk) – preparedness to parry", in the case of destructive impact of multiple internal and/or external threats, including those of an irreversible nature. The principle of diverse actuation protection is oriented to the adaptive support systems for ensuring regional security, capable of self-organization and operating according to non-programmable logic. The diversity in protection is achieved by means of the use of mutually redundant channels and security elements, or through expansion of the existing system by additional security support tools built on fundamentally diverse methods and approaches. As a rule, parametric diversity is programmable and expects the activation and actuation (launch) of control algorithms (regulators) appropriate to the situation based on monitoring data on the security parameters state of the controlled system and control of their permissible values and variations. The application of the diversity principle allows taking into account the influences of the human factor in problem-solving of security control of the socio-economic systems.

9. *The principle of "technical cannibalism".* This principle involves the use of resources of regional socio-economic system elements that have degraded or lost their functionality as a result of the impact of multiple threats in the interests of operability recovery of the other critical facilities of these systems and resilience support of the critical infrastructures of the region that integrate these objects. This principle is implemented in the process of transformation and evolution of regional critical infrastructures that is often caused by changes in their properties, system requirements, high dynamics of the external environment, etc., in order to adapt regional security systems to new challenges and changing operating conditions. This contributes to the rational choice of forces and means to security ensuring for the purposes of risk minimization of the functionality loss of critical facilities of the region.

Towards the end of our discussion, it is appropriate to assign a number of problem issues in the theory of regional security, which scientists and authorities have yet to comprehend in the process of developing this research streamline. Day by day, the requirements for technologies and support tools of security ensuring of the regional critical infrastructures are tightening and raising. The theory of regional security and its toolkit are not in time to keep abreast of the times with these requirements. That makes it difficult for the situational control systems to respond timely to new threats to sustainable regional development. At the same time, the latent or spontaneous character, the various nature and the slow growth of potential threats and dangers in all critical areas of the socio-economic system functioning provoke the emergence of crisis situations for which everything cannot be taken into account and planned in advance. Therefore, the models and methods of regional security management used today in practice and based on a logical-probabilistic approach to risk assessment and analysis need to be theoretically rethought in the focus on providing mechanisms for rapid recovery and adaptation of regional systems to the consequences of the impact on their critical elements of multiple negative factors. The transition to the theory of socio-economic system resilience [33], as a new comprehensive con-

cept of organizing the security of these systems, is one of the ways to solve this problem. In the course of interdisciplinary studies of the socio-economic system security, disagreements arise in the interpretation of the key concepts of this subject domain: threat, hazard, critical facility, incident, crisis situation, protection mechanism, forces and means, critical infrastructure, risk, and others. This indicates that the terminological and formal apparatus of the theory of regional security requires additional scientific research, analysis and interdisciplinary interfacing. Another problem of regional security methodology is the inability to control the forecast precision of crisis situations in real sectors of the socio-economic system development, while simulation experiments on individual object and critical infrastructure models are not able to predict the full picture of possible incidents in these systems. That is, forecasts are approximate nature, and this, in turn, affects the efficiency of the ongoing anti-crisis measures. Up to date, the development of digital twins and its combinations is one of the promising technological solutions to this problem.

The regional security methodology is focused on solving its own class of multi-objective optimization problems of risk assessment and analysis of the security violation of regional critical infrastructures functioning. These problems enclose local criteria (quality objective functions) that can be unmatched or fuzzy, and their parameters values can be characterized by randomness, high entropy, belonging to a multidimensional probability distribution, or error content. To efficient solving this class of problems, special mathematical methods and computer simulation tools are used [1, 3-5, 8].

The application of logical-probabilistic methods (e.g., "event tree" or "failure tree" methods) is of little use for regional security management and expects the statistical stability (homogeneity) analysis of the considered set of probable critical situations that are rare in recurrence and random. It has been experimentally founded that in practice a complete analysis of the statistical stability of critical situations is sometimes impossible and is highly laborious. In addition, this class of methods operates with conditional rather than true probabilities (risks) of the critical situations emergence. That reduces the accuracy of security estimate of the system when a threat or event is implemented. At the same time, only on the basis of the frequency stability analysis of adverse events occurrence, one can judge the nature and matter of certain crisis phenomena and evaluate their impact on the system functioning and its elements. Another contradiction, that arises when using statistical methods at the stages of security risks prediction of the system (risk assessment and consequences forecasting are subject to a probability law) and countermeasures planning to the consequences of critical situations, is due to the fact that the probabilistic problem of optimal choice of the regional security support system configuration options is in the final analysis reduced to a rigidly determined one. Even so, it is known that probability laws are irreducible to the principles of rigid determinacy [3].

For recent time past, in public policy and debates, there has been already a shift in emphasis from regional security (critical infrastructure protection) to that of resilience of the regional socio-economic systems. Comprehensive regional security ensuring by full protection of the critical facilities and infrastructure in the region can never be guaranteed, and achieving the desired guaranteed level of security is normally not cost-effective in relation to the actual threats. Therefore, one should put more focus on adaptive measures and quick recovery. Thus, the novel resilience approach in the theory of regional security should focus on both the pre-crisis phase and the during-crisis (response, adaptation) and even less to the after-crisis (recovery) phases. But this requires a developed legal and regulatory framework, as well as the positioning of a new methodology of regional security based on the principles of the digital economy, in the structure of public administration. This is a grand problem that has yet to be solved by researchers and specialists in regional security at a new historical stage in the development of the theoretical foundations of the security of socio-economic systems.

Conclusion

The study explores an important and promising research area – regional security. It is shown that regional security covers a variety of management aspects and scopes, which are essentially very diverse (economic, environmental, social, energy, military, industrial, personnel and other types of security). All of them are naturally interconnected and affect the functioning and development of regional socio-economic systems in different ways. These aspects need to be linked into a single whole. Thereto, a clearly-build and well-defined theory of regional security, which methodology considers all the diversity of security management aspects of the region from a unified standpoint of their influence on the stability and resilience of regional socio-economic systems, is needed. In our country and abroad, attempts to streamline and centralized control of the entire range of the regional security and resilience characteristics of socio-economic systems subject to the hierarchical design of the regional security support and evaluation system, have been re-

peatedly made. However, rigid centralized control did not provide the desired effect, even at the analysis level of the each regional security area separately, which has its own specific attributes and features.

To overcome these difficulties, the theory and methodology of regional security should be drawn on the general principles of network-centric (distributed) control of complex systems. The network-centric approach most sufficiently reflects the real nature of various level socio-economic system management and takes into account the decentralized nature of the ensuring processes of regional security both in terms of functional and organizational structure subject to the priori and posteriori information on the control object, the external environment and internal disturbances. In terms of the theory of socio-economic system management, such a flexible approach in the regional security methodology has not yet been implemented. The network structure of the organizational management of regional security provides the efficiency enhancement of the threat parrying measures implemented by the regional security support system at the expense of coordination and goal-oriented planning of the critical facilities security of the region within the unified information space. According to expert judgements, the application of such an approach to developing regional security support systems, for instance based on a system of distributed situational centers [36], is economically more costly than centralized solutions. However, the operability recovery costs of the critical elements and infrastructures of regional socio-economic systems and the consequences elimination costs of the critical situations are meanwhile much less than in the case of centralized control and support of regional security.

Despite the fact that today the theory of regional security is still in the phase of rapid development, it can be confidently asserted that it is an independent branch of the security science of complex systems. It has its own methodological base and formal apparatus built on the basis of knowledge domains already formed in the research agenda, namely control theory, stability theory, reliability theory, survivability theory, risk management, sensitivity theory, general system theory and quite a number of other scientific disciplines.

In perspective, further development of regional security fundamentals and methodology (theory and practice of security management of large-scale socio-economic systems) will be carried out in the following areas of basic and applied research:

- adaptation and spreading of the regional security theoretical apparatus to the management problems of the regional critical infrastructures resilience (resilience as a new comprehensive enveloping concept of security organization);
- shifting from "object-focused" models of the security situational control to the "function-focused" models, i.e. stealing the spotlight from goal-oriented planning of preventive measures for ensuring the security of socio-economic systems to targeted support of the flexible recovery of these systems functionality after multiple threats impact and adaptation to new operating conditions;
- engineering of models for the decentralized control coordination of regional security and methods for the situational awareness support at all levels of managerial decision-making;
- development of the theory of destructors (decomposers) that constitute implicit (hidden) sources of threats and dangers, accumulating over time within the socio-economic systems and that are able to randomly affect the normal functioning of individual elements and processes in these systems, as well as the system as a whole;
- toolkit design for problem monitoring and risk auditing of regional security, as well as the methods for risk analysis and potential threats and dangers identification at the initial stages of their life-cycle;
- development a set of the well-grounded and justified methods for scenario analysis of the behavior dynamics of the critical facilities under the destructive impact of internal and external threats for the purpose to estimate their stability limits, the recovery time of system functions and the options for adapting to parameters variations of the operating environment;
- engineering of computer-aided technologies for implementation and deployment of the intelligent information-management systems and network-centric digital platforms to situational control of regional security under uncertainty;
- optimization problems definition on the dynamic configuration of support tools (i.e. situational centers) for the ensuring of regional security and these problems step-by-step solving by methods that are appropriate to the efficiency target indices of anti-crisis management;
- regulatory and legal framework improvement of the theory of regional security, regional security methodology and management support tools;
- research substantiation of public administration digital transformation (virtualization) in the field of regional security ensuring under digital economy era.

References

1. Masloboev A.V., Putilov V.A. *Informatsionnoe izmerenie regional'noy bezopasnosti v Arktike = Information dimension of regional security in the Arctic*. Apatity: KNTs RAN, 2016:222. (In Russ.)
2. The National Security Strategy of the Russian Federation (approved by Presidential Decree No. 400 of July 2, 2021). (In Russ.). Available at: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/QZw6hSk5z9gWq0plD1ZzmR5cER0g5tZC.pdf>
3. Popkov Yu.S. *Matematicheskaya demoekonomika: makrosistemnyy podkhod = Mathematical demoeconomics: a macrosystem approach*. Moscow: Lenand, 2013:560. (In Russ.)
4. Shul'ts V.L., Kul'ba V.V., Shelkov A.B., Chernov I.V. *Stsenarnyy analiza v upravlenii geopoliticheskim informatsionnym protivoborstvom = Scenario analysis in the management of geopolitical information confrontation*. Moscow: Nauka, 2015:542. (In Russ.)
5. Tsygichko V.N., Chereshkin D.S., Smolyan G.L. *Bezopasnost' kriticheskikh infrastruktur = Safety of critical infrastructures*. Moscow: URSS, 2019:200. (In Russ.)
6. Yusupov R.M. *Nauka i natsional'naya bezopasnost' = Science and national security*. 2nd ed. Saint Petersburg: Nauka, 2011:369. (In Russ.)
7. Severtsev N.A., Betskov A.V. *Sistemnyy analiz teorii bezopasnosti = System analysis of security theory*. 2nd ed., rev. and add. Moscow: Yurayt, 2020:456. (In Russ.)
8. Burkov V.N., Gratsianskiy E.V., Dzyubko S.I., Shchepkin A.V. *Modeli i metody upravleniya bezopasnost'yu = Models and methods of safety management*. Moscow: Sinteg, 2001:139. (In Russ.)
9. Malinetskiy G.G. *Upravlenie riskom. Risk, ustoychivoe razvitie, sinergetika = Risk, sustainable development, synergetics*. Moscow: Nauka, 2000:432. (In Russ.)
10. Masloboev A.V. Model and technology of decision support in the conditions of network-centric management of regional security. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2019;(2):43–59. (In Russ.)
11. Tomovich R., Vukobratovich M. *Obshchaya teoriya chuvstvitel'nosti = General theory of sensitivity*. Moscow: Sovetskoe radio, 1972:240. (In Russ.)
12. Vol'mir A.S. *Ustoychivost' deformiruemyykh sistem: v 2 ch. 3-e izd., ster. = Stability of deformable systems: in 2 parts. 3rd ed., ster.* Moscow: Yurayt, 2018;(pt.1):526, (pt. 2):480. (In Russ.)
13. Masloboev A.V. Models of regional crisis situations and their application in decision support systems of situational centers. *Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiyskoy akademii nauk = Proceedings of the Institute of System Analysis of the Russian Academy of Sciences*. 2021;71(3):57–71. (In Russ.)
14. Barbashin E.A. *Vvedenie v teoriyu ustoychivosti = Introduction to the theory of stability*. Moscow: Librokom, 2014:230. (In Russ.)
15. Tom R. *Strukturnaya ustoychivost' i morfogenez = Structural stability and morphogenesis*. Moscow: Logos, 2002:280. (In Russ.)
16. Anosov D.V. Rough systems. *Trudy MIAN SSSR = Proceedings of the MIAN USSR*. 1985;169:59–93. (In Russ.)
17. Andronov A.A., Leontovich E.A., Gordon I.M., Mayer A.G. *Teoriya bifurkatsiy dinamicheskikh sistem na ploskosti = Theory of bifurcations of dynamical systems on a plane*. Moscow: Nauka, 1967:488. (In Russ.)
18. Katok A.B., Khassel'blat B. *Vvedenie v sovremennuyu teoriyu dinamicheskikh sistem: per. s angl. = Introduction to the modern theory of dynamical systems : trans. from English*. Moscow: Faktorial, 1999:768. (In Russ.)
19. Zeeman E.C. *Catastrophe Theory-Selected Papers 1972–1977*. MA: Addison-Wesley, 1977:675.
20. Arnol'd V.I. *Teoriya katastrof. = Theory of catastrophes*. 3rd ed., add. Moscow: Nauka, 1990:128. (In Russ.)
21. Dzhakal'ya G.E.O. *Metody teorii vozmushcheniy dlya nelineynykh system = Methods of perturbation theory for nonlinear systems*. Moscow: Nauka, 1979:320. (In Russ.)
22. Severtsev N.A., Betskov A.V., Prokop'ev I.V. System representation of safety methodology. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(2):26–31. (In Russ.)
23. Novikov D.A. *Teoriya upravleniya organizatsionnymi sistemami = Theory of management of organizational systems*. 3rd ed., rev. and add. Moscow: Fizmatlit, 2012:604. (In Russ.)
24. Yurkov N.K., Semenov A.D. *Modelirovanie sistem upravleniya = Modeling of control systems*. Saint Petersburg: Lan', 2022:328. (In Russ.)
25. Masloboev A.V. A unified system for ensuring the regional security. *Reliability and Quality of Complex Systems*. 2022;(1).
26. Novikov D.A. *Metodologiya upravleniya = Management methodology*. Moscow: Librokom, 2011:128. (In Russ.)
27. Ryabinin I.A. *Nadezhnost' i bezopasnost' slozhnykh system = Reliability and safety of complex systems*. Saint Petersburg: Politekhnik, 2000:248. (In Russ.)
28. Yurkov N.K., Mikhaylov V.S. *Integral'nye otsenki v teorii nadezhnosti. vvedenie i osnovnye rezul'taty = Integral estimates in the theory of reliability. introduction and main results*. Moscow: Tekhnosfera, 2020:152. (In Russ.)
29. Sholomnitskiy A.G. *Teoriya riska. Vybor pri neopredelennosti i modelirovanie riska = Choice under uncertainty and risk modeling*. Moscow: GU VShE, 2005:400. (In Russ.)
30. Krapivin V.F. *O teorii zhivuchesti slozhnykh system = On the theory of survivability of complex systems*. Moscow: Nauka, 1978:248. (In Russ.)

31. Sokolov B.V., Ivanov D.A., Pavlov A.N., Slin'ko A.A. Simulation modeling of the survivability of critical infrastructures. *Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika: tr. VII Vseros. nauchno-praktich. konf. (21–23 oktyabrya 2015 g., Moskva): v 2 t. = Simulation modeling. Theory and practice : tr. VII All-Russian Scientific and Practical Conference (October 21-23, 2015, Moscow) : in 2 volumes.* Moscow: IPU RAN, 2015;1:162–167. (In Russ.)
32. Rød B., Lange D., Theocharidou M., Pursiainen C. From risk management to resilience management in critical infrastructure. *Management in Engineering.* 2020;(36):04020039.
33. Masloboev A.V. Bystrov V.V. Conceptual model of critical infrastructure viability in the context of modern security theory of complex systems. *Ekonomika. Informatika = Economy. Computer science.* 2020;47(3):555–572. (In Russ.)
34. Masloboev A.V. Towards a theory of regional critical infrastructure security and resilience. *Reliability and quality of complex systems.* 2020;(4):115–130.
35. Masloboev A.V. Regional management center framework for G2C-feedback and public safety support. *Reliability and quality of complex systems.* 2021;(4):127–138.
36. Masloboev A.V. The concept of the Center for Advanced Research and security of the Arctic. *Arktika: ekologiya i ekonomika = Arctic: ecology and economics.* 2019;(2):129–143. (In Russ.)

Список литературы

1. Маслобоев А. В., Путилов В. А. Информационное измерение региональной безопасности в Арктике. Апатиты : КНЦ РАН, 2016. 222 с.
2. Стратегия национальной безопасности Российской Федерации (утв. Указом Президента РФ № 400 от 2 июля 2021 г.). URL: <http://static.kremlin.ru/media/events/files/ru/QZw6hSk5z9gWq0plD1ZzmR5cER0g5tZC.pdf>
3. Попков Ю. С. Математическая демоэкономика: макросистемный подход. М. : Ленанд, 2013. 560 с.
4. Шульц В. Л., Кульба В. В., Шелков А. Б., Чернов И. В. Сценарный анализа в управлении геополитическим информационным противоборством. М. : Наука, 2015. 542 с.
5. Цыгичко В. Н., Черешкин Д. С., Смолян Г. Л. Безопасность критических инфраструктур. М. : УРСС, 2019. 200 с.
6. Юсупов Р. М. Наука и национальная безопасность. 2-е изд. СПб. : Наука, 2011. 369 с.
7. Северцев Н. А., Бецков А. В. Системный анализ теории безопасности. 2-е изд., пер. и доп. М. : Юрайт, 2020. 456 с.
8. Бурков В. Н., Грацианский Е. В., Дзюбка С. И., Щепкин А. В. Модели и методы управления безопасностью. М. : Синтег, 2001. 139 с.
9. Малинецкий Г. Г. Управление риском. Риск, устойчивое развитие, синергетика. М. : Наука, 2000. 432 с.
10. Маслобоев А. В. Модель и технология поддержки принятия решений в условиях сетецентрического управления региональной безопасностью // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 2. С. 43–59.
11. Томович Р., Вукобратович М. Общая теория чувствительности. М. : Советское радио, 1972. 240 с.
12. Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем : в 2 ч. 3-е изд., стер. М. : Юрайт, 2018. Ч. 1. 526 с.; Ч. 2. 480 с.
13. Маслобоев А. В. Модели региональных кризисных ситуаций и их применение в системах поддержки принятия решений ситуационных центров // Труды Института системного анализа Российской академии наук. 2021. Т. 71, № 3. С. 57–71.
14. Барбашин Е. А. Введение в теорию устойчивости. М. : Либроком, 2014. 230 с.
15. Том Р. Структурная устойчивость и морфогенез. М. : Логос, 2002. 280 с.
16. Аносов Д. В. Грубые системы // Труды МИАН СССР. 1985. Т. 169. С. 59–93.
17. Андронов А. А., Леонтович Е. А., Гордон И. М., Майер А. Г. Теория бифуркаций динамических систем на плоскости. М. : Наука, 1967. 488 с.
18. Каток А. Б., Хассельблат Б. Введение в современную теорию динамических систем : пер. с англ. М. : Факториал, 1999. 768 с.
19. Zeeman E. C. Catastrophe Theory-Selected Papers 1972–1977. MA: Addison-Wesley, 1977. 675 p.
20. Арнольд В. И. Теория катастроф. 3-е изд., доп. М. : Наука, 1990. 128 с.
21. Джакаля Г. Е. О. Методы теории возмущений для нелинейных систем. М. : Наука, 1979. 320 с.
22. Северцев Н. А., Бецков А. В., Прокопьев И. В. Системное представление методологии безопасности // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 2. С. 26–31.
23. Новиков Д. А. Теория управления организационными системами 3-е изд., испр. и дополн. М. : Физматлит, 2012. 604 с.
24. Юрков Н. К., Семенов А. Д. Моделирование систем управления. СПб. : Лань, 2022. 328 с.
25. Masloboev A. V. A unified system for ensuring the regional security // Reliability and Quality of Complex Systems. 2022. № 1.
26. Новиков Д. А. Методология управления. М. : Либроком, 2011. 128 с.
27. Рябинин И. А. Надежность и безопасность сложных систем. СПб. : Политехника, 2000. 248 с.

28. Юрков Н. К., Михайлов В. С. Интегральные оценки в теории надежности. введение и основные результаты. М. : Техносфера, 2020. 152 с.
29. Шоломницкий А. Г. Теория риска. Выбор при неопределенности и моделирование риска. М. : ГУ ВШЭ, 2005. 400 с.
30. Крапивин В. Ф. О теории живучести сложных систем. М. : Наука, 1978. 248 с.
31. Соколов Б. В., Иванов Д. А., Павлов А. Н., Слинко А. А. Имитационное моделирование живучести критических инфраструктур // Имитационное моделирование. Теория и практика : тр. VII Всерос. научно-практич. конф. (21–23 октября 2015 г., Москва) : в 2 т. М. : ИПУ РАН, 2015. Т. 1. С. 162–167.
32. Rød, B., Lange, D., Theodoridou, M., Pursiainen, C. From risk management to resilience management in critical infrastructure // Management in Engineering. 2020. № 36. P. 04020039.
33. Маслобоев А. В. Быстров В. В. Концептуальная модель жизнеспособности критических инфраструктур в контексте современной теории безопасности сложных систем // Экономика. Информатика. 2020. Т. 47, № 3. С. 555–572.
34. Masloboev A. V. Towards a theory of regional critical infrastructure security and resilience // Reliability and quality of complex systems. 2020. № 4. P. 115–130.
35. Masloboev A. V. Regional management center framework for G2C-feedback and public safety support // Reliability and quality of complex systems. 2021. № 4. P. 127–138.
36. Маслобоев А. В. Концепция Центра перспективных исследований и обеспечения безопасности Арктики // Арктика: экология и экономика. 2019. № 2. С. 129–143.

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Владимирович Маслобоев

доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник,
Институт информатики и математического
моделирования технологических процессов
Кольского научного центра Российской академии наук
(Россия, Апатиты, ул. Ферсмана, 24А)
E-mail: masloboev@iimm.ru

Andrey V. Masloboev

Doctor of technical sciences, associate professor,
leading researcher,
Institute of Informatics and Mathematical Modelling
of Technological Processes of Kola Science Centre
of the Russian Academy of Sciences
(24A Fersmana street, Apatity, Russia)

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /
The authors declare no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 20.06.2021

Поступила после рецензирования/Revised 10.09.2021

Принята к публикации/Accepted 25.10.2021