

СОДЕРЖАНИЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

Якимов А. Н. УНИВЕРСАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ИЗЛУЧЕНИЯ МИКРОВОЛНОВОЙ АНТЕННЫ.....	5
Абрамов О. В. ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИЕ ФАКТОРЫ И СЛУЧАЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ.....	13
Годунов А. И., Суздальцев П. С., Жежук А. А., Избасов А. Г., Мухамбетов А. М., Юрков Н. К. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛЕТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА	21
Садыхов Г. С., Кудрявцева С. С., Дубровин В. М. ПРИЗНАКИ СХОДИМОСТИ И РАСХОДИМОСТИ ИНТЕГРАЛОВ РЕСУРСА НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ.....	31
Морозов В. Б., Морозова М. А. О МЕТОДАХ ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЕКТИРУЕМОЙ АЭС ПРИ ОБЪЕДИНЕНИИ ДАННЫХ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ	39

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Старостин И. Е. ПОСТРОЕНИЕ НА ОСНОВЕ ИНТЕРПОЛЯЦИИ МОДЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ.....	49
Павлов А. А., Царьков А. Н., Романенко Ю. А., Корнеев И. И., Романенко А. Ю., Макеев М. И., Павлов Ф. А. ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ЭВМ	59
Новомейский Д. Н., Пиганов М. Н., Лупцов А. А., Перевертов В. П. МЕТОДИКА РЕГУЛИРОВКИ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРОВ	70
Ошкин А. А., Филиппов Д. Ф., Годунов А. И. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ БОЕПРИПАСОВ С МАЛОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ К ВНЕШНИМ ТЕПЛОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ ВЗРЫВЧАТЫМИ СОСТАВАМИ	81
Китаев В. Н., Афанасьев Р. А., Петров М. В. ИНЕРЦИОННЫЙ ВКЛЮЧАТЕЛЬ С ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ДЕМПФИРОВАНИЕМ ИНЕРЦИОННОГО ТЕЛА.....	88

Китаев В. Н., Сафонов Д. И., Бабушкина Е. В., Спрогис Р. В., Родионов И. В. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПОЛЯРИЗОВАННЫЙ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ С БЕЗРЕБЕЗГОВОЙ КОНТАКТНОЙ СИСТЕМОЙ.....	98
---	----

Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А., Бадеев В. А. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДЛЯ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА КАЧЕСТВА НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ.....	108
---	-----

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

Кривоногов А. Ю., Геращенко М. С., Геращенко С. И., Митрошин А. Н., Левин С. Ф. НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДУЛЬ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ СИСТЕМ АМБУЛАТОРНОГО ПЕРСОНАЛЬНОГО ТЕЛЕМОНИТОРИНГА ЭКГ	116
---	-----

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Masloboev A.V. AN INDEX-BASED METHOD FOR INTEGRAL ESTIMATION OF REGIONAL CRITICAL INFRASTRUCTURE RESILIENCE USING FUZZY CALCULATIONS (PART 1. PROBLEM STATEMENT AND METHOD GENERIC STRUCTURE)	124
---	-----

Кузнецова О. В., Шорин В. А., Алмаметов В. Б. ИНФОРМАЦИОННОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ГЕТЕРОСТРУКТУР БЕЗОПАСНОСТИ	142
--	-----

ДАЙДЖЕСТ СТАТЕЙ ЗА 2023 г.....	151
---------------------------------------	-----

RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

№ 1 (45) 2024

CONTENT

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

Yakimov A.N. UNIVERSAL RADIATION MODEL OF MICROWAVE ANTENNA.....	5
Abramov O.V. DESTABILIZING FACTORS AND RANDOM PROCESSES OF CHANGING PARAMETERS OF ENGINEERING DEVICES AND SYSTEMS	13
Godunov A.I., Suzdaltsev P.S., Zhezhuk A.A., Izbasov A.G., Mukhambetov A.M., Yurkov N.K. MATHEMATICAL MODEL OF FLIGHT AN UNMANNED AERIAL VEHICLE	21
Sadykhov G.S., Kudryavtseva S.S., Dubrovin V.M. SIGNS OF CONVERGENCE AND DIVERGENCE OF INTEGRALS OF THE OPERATING LIFE OF NON-RESTORABLE ITEMS	31
Morozov V.B., Morozova M.A. ON METHODS FOR ASSESSING EQUIPMENT FAILURE RATES FOR PROBABILISTIC SAFETY ANALYSIS OF NUCLEAR POWER PLANTS AT DESIGN STAGE WHEN POOLING DATA FROM VARIOUS SOURCES.....	39

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

Starostin I.E. BUILDING, BASED ON INTERPOLATION, MODELS OF VARIOUS PHYSICAL AND CHEMICAL SYSTEMS BY METHOD OF MATHEMATICAL PROTOTYPING OF ENERGY PROCESSES	49
Pavlov A.A., Tsarkov A.N., Romanenko Yu.A., Korneev I.I., Romanenko A.Yu., Makeev M.I., Pavlov F.A. FORMATION OF A METHOD FOR INCREASING THE RELIABILITY OF SPECIALIZED COMPUTERS.....	59
Novomeisky D.N., Piganov M.N., Luptsov A.A., Perevertov V.P. THE METHOD OF ADJUSTING THE AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS OF FILTERS	70
Oshkin A.A., Filippov D.F., Godunov A.I. METHODOLOGY FOR ASSESSING THE OPERATIONAL SAFETY OF AMMUNITION WITH EXPLOSIVES THAT ARE INSENSITIVE TO EXTERNAL THERMAL INFLUENCES	81
Kitayev V.N., Afanasiev R.L., Petrov M.V. INERTIA SWITCH WITH HYDRAULIC DAMPING OF THE INERTIAL BODY	88
Kitayev V.N., Safonov D.I., Babushkina E.V., Sprogis R.V., Rodionov I.V. ELECTROMAGNETIC POLARIZED SWITCH WITH BOUNCE-FREE CONTACT SYSTEM.....	98

Murashkina T.I., Badeeva E.A., Badeev V.A.

CONSTRUCTIVE AND TECHNOLOGICAL SOLUTION FIBER OPTIC SENSOR
FOR EXPRESS ANALYSIS OF THE QUALITY OF OIL AND PETROLEUM PRODUCTS 108

DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

Krивonogov L.Yu., Gerashchenko M.S., Gerashchenko S.I., Mitroshin A.N., Levin S.F.

NEURAL NETWORK MODULE FOR QUALITY CONTROL OF REGISTERED SIGNALS
FOR AMBULATORY PERSONAL TELEMONITORING ECG SYSTEMS 116

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

Masloboev A.V.

AN INDEX-BASED METHOD FOR INTEGRAL ESTIMATION OF REGIONAL
CRITICAL INFRASTRUCTURE RESILIENCE USING FUZZY CALCULATIONS
(PART 1. PROBLEM STATEMENT AND METHOD GENERIC STRUCTURE) 124

Kuznetsova O.V., Shorin V.A., Almametov V.B.

INFORMATION AND LOGICAL MODELS
OF THE DYNAMICS OF SECURITY HETEROSTRUCTURES 142

DIGEST OF ARTICLES 2023 151

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 621.396.677: 519.711.3
doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-1

УНИВЕРСАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ИЗЛУЧЕНИЯ МИКРОВОЛНОВОЙ АНТЕННЫ

А. Н. Якимов

Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, Россия
y_alder@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Характеристики направленности микроволновых антенн определяются функциональным назначением радиотехнических систем, в составе которых они используются. Заданные характеристики антенн могут обеспечиваться формированием в их апертуре как синфазных, так и переменнораспределений источников возбуждения (токов или полей), имеющих специфику математического описания. Построение универсальной математической модели, адекватно описывающей излучение антенн с разным видом распределений источников возбуждения, позволит расширить возможности решения задачи проектирования микроволновых антенн заданными характеристиками направленности. *Материалы и методы.* Предложен подход к решению этой задачи, основанный на использовании сочетания аналитического и численного методов, позволяющий описать отдельные участки распределения источников возбуждения разными формулами и управлять их параметрами для достижения заданных характеристик направленности антенны. Показана возможность программной реализации предложенной математической модели в системе MATLAB с использованием логики предикатов. *Результаты и выводы.* Приведены результаты модельного исследования влияния параметров амплитудно-фазового распределения источников возбуждения в апертуре микроволновой антенны на ее диаграмму направленности, подтверждающие адекватность предложенной математической модели. Результаты моделирования указывают на возможность дополнительного улучшения параметров микроволновой антенны за счет независимого управления формой и уровнем отдельных участков распределения источников возбуждения в ее апертуре. Таким образом, появляется возможность оптимизации микроволновых антенн с характеристиками направленности заданного вида еще на этапе проектирования.

Ключевые слова: микроволновая антенна, распределение источников возбуждения, излучение, математическая модель, диаграмма направленности

Для цитирования: Якимов А. Н. Универсальная модель излучения микроволновой антенны // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 5–12. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-1

UNIVERSAL RADIATION MODEL OF MICROWAVE ANTENNA

A.N. Yakimov

Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Saint Petersburg, Russia
y_alder@mail.ru

Abstract. *Background.* The directional characteristics of microwave antennas are determined by the functional purpose of the radio engineering systems in which they are used. The specified characteristics of antennas can be

provided by the formation in their aperture of both in-phase and variable-phase distributions of excitation sources (currents or fields) having the specifics of a mathematical description. The construction of a universal mathematical model that adequately describes the radiation of antennas with different types of distributions of excitation sources will expand the possibilities of solving the problem of designing microwave antennas with specified directional characteristics. *Materials and methods.* An approach to solving this problem is proposed, based on the use of a combination of analytical and numerical methods, which allows describing individual sections of distribution of excitation sources with different formulas and controlling their parameters to achieve the specified antenna directional characteristics. The possibility of software implementation of the proposed mathematical model in the MATLAB system using predicate logic is shown. *Results and conclusions.* The results of a model study of the influence of the parameters of the amplitude-phase distribution of excitation sources in the aperture of a microwave antenna on its radiation pattern are presented, confirming the adequacy of the proposed mathematical model. The modeling results indicate the possibility of additional improvement of the parameters of the microwave antenna due to independent control of the shape and level of individual sections of distribution of excitation sources in its aperture. Thus, it becomes possible to optimize microwave antennas with directional characteristics of a given type at the design stage.

Keywords: microwave antenna, distribution of excitation sources, radiation, mathematical model, radiation pattern

For citation: Yakimov A.N. Universal radiation model of microwave antenna. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):5–12. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-1

Введение

Характеристики направленности микроволновых антенн определяются функциональным назначением радиотехнических систем, в составе которых они используются. В настоящее время наибольшее применение нашли остронаправленные антенны с диаграммами направленности (ДН) «игольчатого» вида, которые позволяют решить большинство задач в области связи, радиолокации, радиоуправления и др. Для формирования таких ДН достаточно сформировать в апертуре антенны синфазное распределение источников возбуждения, описываемое простыми монотонными функциями. Для таких функций известны математические решения, или могут быть построены простые математические модели с малым числом управляющих параметров, описывающие взаимосвязь ДН антенны с распределениями источников возбуждения в ее апертуре [1, 2].

Однако решение радиотехническими системами ряда задач требует использования антенн с ДН специального вида, формирование которых в силу сложности математического описания их излучения можно выделить в отдельную задачу. Так, например, формирование антенной ДН секторного вида, используемой при решении задач на максимальных дальностях в широком секторе углов, требует создания в ее апертуре переменного-фазного распределения источников возбуждения. Математическая модель, основанная на использовании модифицированного ряда Котельникова, частично позволяет решить задачу моделирования излучения такой антенны, но имеет большое число управляющих параметров, часть из которых взаимозависима. Наличие такой взаимозависимости не позволяет исследовать возможности приближения реальной квазисекторной к идеальной секторной ДН [3, 4].

Таким образом, актуальной является задача построения универсальной математической модели, адекватно описывающей излучение антенн с разным видом распределений источников возбуждения (синфазных и переменного-фазных), позволяющей расширить возможности решения задачи проектирования микроволновых антенн заданными характеристиками направленности.

Постановка задачи

Рассмотрим возможность математического моделирования микроволновой антенны с остронаправленной ДН, которую можно считать разделяющейся. Горизонтальное сечение $F(\varphi)$ такой ДН имеет одинаковую форму для разных фиксированных значений угла θ в вертикальной плоскости, и наоборот, вертикальное сечение $F(\theta)$ имеет одинаковую форму для разных фиксированных значений угла φ в горизонтальной плоскости. Тогда двумерная функция, описывающая пространственную ДН антенны $F(\varphi, \theta)$, приближенно может быть описана формулой

$$F(\varphi, \theta) \approx F(\varphi)F(\theta). \quad (1)$$

Выражение (1), описывающее разделяющуюся ДН, тем точнее, чем острее ДН [5].

Соответствующее амплитудно-фазовое распределение источников возбуждения $f(y_\varphi, y_\theta)$ в этом случае также оказывается разделяющимся

$$f(y_\varphi, y_\theta) \approx f(y_\varphi) f(y_\theta), \quad (2)$$

где $f(y_\varphi)$, $f(y_\theta)$ – распределения источников возбуждения в плоскостях углов φ и θ соответственно.

В этом случае возникает возможность независимого управления формой ДН антенны за счет изменения распределения ее источников возбуждения в каждой из плоскостей отдельно.

Математическое описание направленности излучения микроволновой антенны в горизонтальной плоскости в интегральной форме может быть представлено преобразованием Фурье [6]

$$R(z) = \frac{1}{2\pi} \int_{-1}^1 f(y) e^{jzy} dy, \quad (3)$$

где $R(z)$ – функция, описывающая ДН антенны по полю; $z = \pi(l/\lambda)\sin\varphi$; l – линейный размер сечения апертуры антенны; λ – длина электромагнитной волны; φ – угол между направлением на точку наблюдения и нормалью к антенне; $y = 2x/l$; x – расстояние до текущей точки сечения апертуры антенны относительно ее центра; $f(y)$ – распределение источников возбуждения антенны.

Выражение (3) позволяет для распределения поля $f(y)$ произвольного вида рассчитать соответствующую амплитудную ДН $|R(z)|$ антенны и исследовать возможность оптимизации ее параметров. Таким образом, универсальную математическую модель можно будет считать построенной, если создать универсальное математическое описание для синфазного и переменного-фазного распределений источников возбуждения. Такая модель позволит расширить возможности оптимизации микроволновых антенн с характеристиками направленности заданного вида еще на этапе проектирования.

Построение математической модели

Наиболее распространенные ДН «игольчатого» вида, формируемые синфазными распределениями поля, широко освещены в литературе по антенной технике. Формулы, описывающие ДН и соответствующие им распределения источников возбуждения для фиксированных значений уровня боковых лепестков (УБЛ) ДН, обычно сведены в таблицы [1, 7].

Однако точно сформировать ДН с требуемым УБЛ они позволяют не всегда, так как ориентируются на целые показатели степени. Введение же дробных показателей в эти формулы и использование для расчета численных методов позволяет устранить этот недостаток и провести исследования взаимосвязей параметров амплитудно-фазных распределений источников возбуждения и соответствующих ДН антенн.

Выберем в качестве математического описания синфазного амплитудного распределения функцию косинусного типа

$$f(y) = A_0 \cos^n(\pi y / 2), \quad (4)$$

где A_0 – коэффициент амплитуды; n – целый или дробный показатель степени.

Эта же функция может быть положена в основу математического описания центрального участка переменного-фазного амплитудного распределения источников возбуждения. Математическая модель амплитудно-фазового распределения источников возбуждения в этом случае представляется в виде комбинации функций: косинуса степени m с коэффициентом A_1 для описания центрального участка и синуса с произвольным коэффициентом A_2 для описания противофазных участков (рис. 1, а).

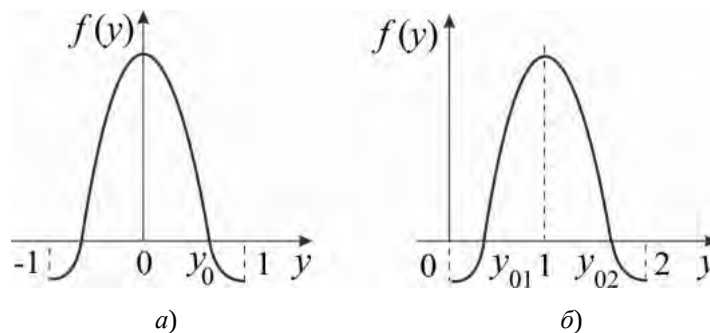


Рис. 1. Амплитудные переменного-фазные распределения источников возбуждения антенны: а – несмещенное; б – смещенное

Для описания переменного-фазного распределения источников возбуждения, обеспечивающего формирование квазисекторной ДН с заданными параметрами, оказывается достаточным присутствие симметрично относительно центрального лепестка только по одному противофазному участку. При этом для учета доли противофазного участка в распределении источников возбуждения вводится параметр α_0 , который может быть описан как $\alpha_0 = 1/y_0$, где y_0 – координата точки смены фазы в сечении амплитудного распределения источников возбуждения [8].

Для удобства численного интегрирования в системе MATLAB представим распределение амплитуд источников возбуждения $f(y)$ смещенным относительно оси координат (рис. 1,б).

Для расчета ДН при этом можно воспользоваться выражением (3), изменив в нем пределы интегрирования от $-l/2$ до $l/2$ на интервал от 0 до l , что соответствует изменению y от 0 до 2 в смещенном распределении источников возбуждения антенны.

При этом выражение (3) преобразуется к виду

$$R(z) = \frac{1}{2\pi} \int_0^2 f(y) e^{jzy} dy. \quad (5)$$

Для удобства интегрирования в MATLAB представим выражение (4) в виде

$$R(z) = \int_{-0}^2 f(y) e^{jyz} dy = \int_{-0}^2 f(y) \cos yz dy + i \int_{-0}^2 f(y) \sin yz dy. \quad (6)$$

Пусть

$$F_1(y) = f(y) \cos yz, \quad F_2(y) = f(y) \sin yz.$$

Тогда

$$R(z) = \int_0^2 F_1(y) dy + i \int_0^2 F_2(y) dy = A + i B = |R(z)| e^{i\Phi(z)}, \quad (7)$$

где $A = \int_0^2 F_1(y) dy$, $B = \int_0^2 F_2(y) dy$, $|R(z)| = \sqrt{A^2 + B^2}$ – искомая амплитудная ДН; $\Phi(z)$ – фазовая ДН.

Математическая модель распределения $f(y)$ при таком представлении будет состоять из трех частей. Центральный участок распределения от $y_{01} = 1 - (1/\alpha_0)$ до $y_{02} = 2 - y_{01}$ при этом опишется выражением

$$f_1(y) = A_1 \cos^m \left[\frac{\pi \alpha_0}{2} (y - 1) \right], \quad (8)$$

где A_1 – коэффициент амплитуды главного лепестка распределения; m – произвольная (целая или дробная) степень.

Первый противофазный участок распределения $f(y)$ на интервале от 0 до y_{01} опишется выражением

$$f_{21}(y) = A_2 \sin[\pi \alpha_0 (1 - y)], \quad (9)$$

где A_2 – коэффициент амплитуды противофазных участков распределения, задающий максимальный уровень противофазного участка (УПУ).

Второй противофазный участок распределения $f(y)$, расположенный на интервале от y_{02} до 2, опишется выражением

$$f_{22}(y) = A_2 \sin[\pi \alpha_0 (y_{02} - y)]. \quad (10)$$

Для алгоритмического объединения расчетных выражений (5)–(7) в единую математическую модель удобно использовать логику предикатов, в частности, предикатную алгебру выбора [9].

В этом случае обязательным является выполнение условия комплементарности, в соответствии с которым

$$a_1 + a_2 + \dots + a_n = 1, \quad a_i \in \{0, 1\}, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (11)$$

Здесь весовые коэффициенты a_i являются двузначными предикатами, а элементарными функциями, воспроизводящими операции выбора одной из двух переменных, являются предикатные конъюнкция и дизъюнкция.

Тогда операция суперпозиции элементов вектора предметных переменных $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ с этими весовыми коэффициентами позволит подключать их независимо и получить результат G :

$$G = u_1 a_1 + u_2 a_2 + \dots + u_n a_n. \quad (12)$$

Предметными переменными в решаемой задаче являются функции, описывающие отдельные участки переменного-фазного распределения ($\alpha_0 > 1$), и функция, описывающая синфазное распределение ($\alpha_0 = 1$) источников возбуждения той же формулой, что и центральный участок переменного-фазного распределения, т.е. $n = 4$. Возможности предлагаемой модели могут быть расширены, если вместо условия $\alpha_0 = 1$ использовать $\alpha_0 \leq 1$, что позволит исследовать и синфазные антенны с пьедесталом в распределении источников возбуждения.

Условия комплементарности при этом описываются как

$$a_1 + a_2 + a_3 + a_4 = 1, \quad (13)$$

а весовые коэффициенты в виде, удобном для программной реализации в системе MATLAB, определены следующим образом:

$$\begin{cases} a_1 = (y \geq 0) \& (y < y_{01}) \& (\alpha_0 > 1), & a_2 = (y \geq y_{01}) \& (y \leq y_{02}) \& (\alpha_0 > 1), \\ a_3 = (y > y_{02}) \& (y \leq 2) \& ((\alpha_0 > 1), & a_4 = (y \geq y_{01}) \& (y \leq y_{02}) \& (\alpha_0 = 1). \end{cases} \quad (14)$$

В результате суперпозиции в соответствии с формулой (9) получим

$$f(y) = a_1 f_{21}(y) + a_2 f_1(y) + a_3 f_{22}(y) + a_4 f_1(y). \quad (15)$$

Таким образом, формулы (7)–(10), (14) и (15) позволяют провести все необходимые расчеты и составляют основу универсальной математической модели излучения микроволновой антенны.

Результаты моделирования

Предложенная математическая модель излучения микроволновой антенны позволила установить связь между параметрами амплитудно-фазового распределения источников возбуждения антенны и ее амплитудной ДН по полю. Расчеты были проведены для микроволновой антенны с относительным линейным размером антенны $l/\lambda = 27$ при различных параметрах амплитудно-фазового распределения источников ее возбуждения, оказывающих влияние на основные параметры формируемой этой антенной ДН, в системе MATLAB с использованием метода трапеций [10].

Для микроволновой антенны с различными амплитудными синфазными распределениями источников возбуждения (рис. 2), управляемыми показателем степени m , получены соответствующие амплитудные ДН антенны (рис. 3).

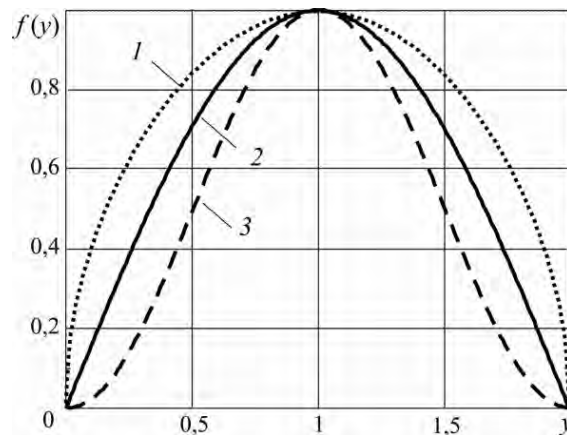


Рис. 2. Амплитудные синфазные распределения источников возбуждения антенны: 1 – $m = 0,5$; 2 – $m = 1$; 3 – $m = 2$

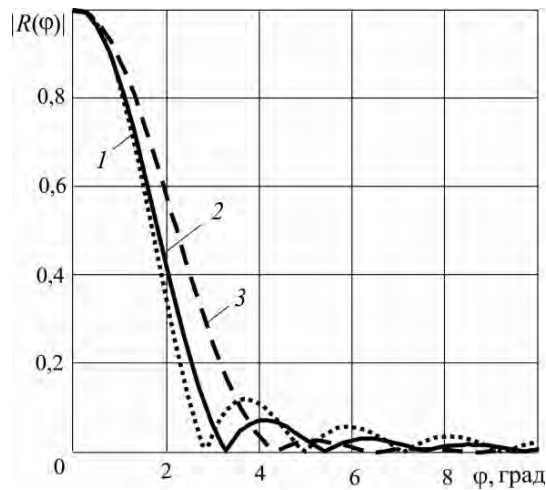


Рис. 3. Амплитудные нормированные ДН по полю антенны с синфазными распределениями источников возбуждения

Полученные ДН указывают на существенное влияние параметра m , на ДН антенны с синфазным распределением источников возбуждения.

Как видно из рис. 2 и 3, при $A_1 = 1$ и дробном показателе степени $m = 0,5$ (рис. 2, кривая 1), когда распределение оказывается наиболее близким к равноамплитудному, ДН (рис. 3, кривая 1) имеет наименьшую ширину на уровне -3 дБ ($2\phi_{0,5} = 2,6^\circ$), а максимальный уровень боковых лепестков (УБЛ) равен $-18,4$ дБ. По мере роста степени распределения до $m = 1$ (рис 2, кривая 2) ДН антенны (рис. 3, кривая 2) расширяется до $2\phi_{0,5} = 2,8^\circ$, а максимальный УБЛ уменьшается до $-22,5$ дБ. Дальнейшее увеличение степени распределения до $m = 2$ (рис 2, кривая 3) приводит к тому, что ДН антенны (рис. 3, кривая 2) расширяется до $2\phi_{0,5} = 3,3^\circ$, а ее максимальный УБЛ уменьшается до $-30,5$ дБ.

Полученные результаты характерны для антенн разного типа с такими распределениями источников возбуждения, что подтверждает адекватность предлагаемой математической модели [1, 7].

Для микроволновой антенны с линейным размером $l/\lambda = 27$ и различными амплитудными переменнo-фазными распределениями источников возбуждения (рис. 4), управляемыми показателем степени m , амплитудой противофазного участка A_2 и коэффициентом $\alpha_0 > 1$, рассчитаны соответствующие амплитудные ДН антенны (рис. 5).

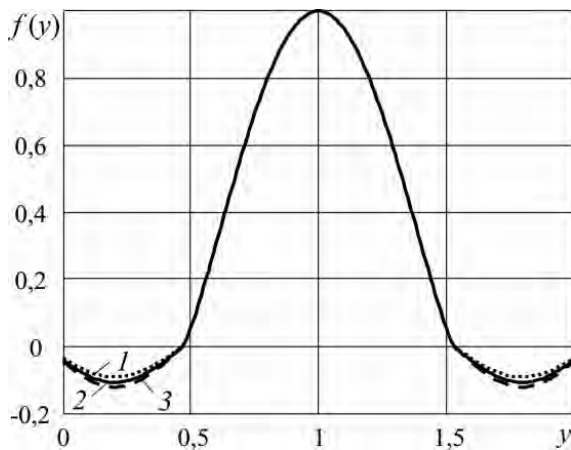


Рис. 4. Амплитудные переменнo-фазные распределения источников возбуждения антенны

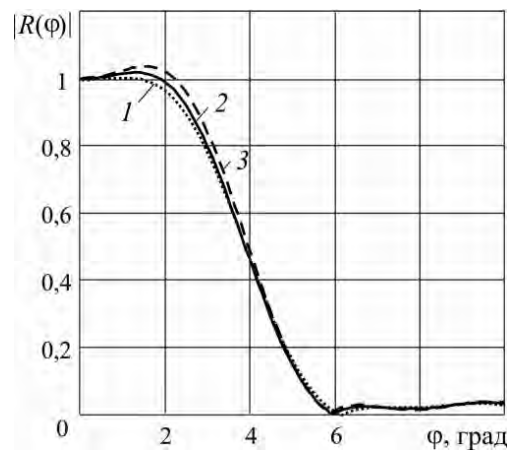


Рис. 5. Амплитудные нормированные ДН по полю антенны с переменнo-фазными распределениями источников возбуждения

Результаты получены при $A_1 = 1$, фиксированной доле противофазного участка $\alpha_0 = 1,88$ в распределениях источников возбуждения, обеспечивающих, как и при использовании модифицированного ряда Котельникова, малый УБЛ ДН, и степени $m = 1,215$, управляющей формой центрального участка распределения [3].

Расчеты показали, что при максимальном УПУ $-20,9$ дБ распределения источников возбуждения (рис. 4, кривая 1) формируется квазисекторная ДН (рис. 5, кривая 1) с шириной на уровне -3 дБ $2\varphi_{0,5} = 6,4^\circ$, уровнем пульсации главного лепестка $\Delta = 0,042$ дБ, крутизной на уровне -3 дБ $\mu = 3,7$ дБ/град, максимальным уровнем первого и второго боковых лепестков $-32,7$ дБ и $-29,2$ дБ соответственно. Распределение источников возбуждения с максимальным УПУ $-19,5$ дБ (рис. 4, кривая 2) формирует квазисекторную ДН (рис. 5, кривая 2) с шириной на уровне -3 дБ $2\varphi_{0,5} = 6,6^\circ$, уровнем пульсации главного лепестка $\Delta = 0,15$ дБ, крутизой на уровне -3 дБ $\mu = 4,2$ дБ/град, максимальным уровнем первого и второго боковых лепестков $-32,8$ и $-29,2$ дБ соответственно. Распределение же источников возбуждения антенны с максимальным УПУ $-18,4$ дБ (рис. 4, кривая 3) формирует квазисекторную ДН (рис. 5, кривая 3) с шириной на уровне -3 дБ $2\varphi_{0,5} = 6,8^\circ$, уровнем пульсации главного лепестка $\Delta = 0,29$ дБ, крутизой на уровне -3 дБ $\mu = 4,5$ дБ/град и максимальным уровнем первого и второго боковых лепестков $-32,2$ дБ и $-29,0$ дБ соответственно.

Из этих рисунков видно, что изменение максимального УПУ при фиксированной доле противофазного участка α_0 мало влияет на максимальный УБЛ, ширину $2\varphi_{0,5}$ и крутизну μ квазисекторной ДН, но существенно изменяет уровень пульсаций Δ ее главного лепестка. Это позволяет дополнительно улучшить форму квазисекторной ДН и приблизить ее к идеальной секторной.

Предложенная математическая модель позволяет получить переменнo-фазные хорошо реализуемые распределения источников возбуждения микроволновой антенны с противофазными участками, симметричными относительно максимумов этих участков, и сформировать квазисекторные ДН с заданным достаточно малым УБЛ.

Учитывая, что известные распределения источников возбуждения, полученные с помощью модифицированного ряда Котельникова, имеют распределения источников возбуждения с асимметричными противофазными участками относительно максимумов этих участков, причем их максимумы смещены относительно края антенны к ее центру, полученные распределения источников возбуждения можно отнести уже к другому виду переменнo-фазных распределений.

Заключение

Предложенная универсальная математическая модель микроволновой антенны удобна для реализации в системе MATLAB и позволяет решить широкий класс задач математического синтеза антенн. Результаты математического моделирования указывают на возможность дополнительного улучшения параметров микроволновой антенны за счет независимого управления формой и уровнем отдельных участков распределений источников возбуждения в ее апертуре. Таким образом, появляется возможность оптимизации микроволновых антенн с характеристиками направленности заданного вида еще на этапе проектирования.

Список литературы

1. Воскресенский Д. И., Гостюхин В. Л., Максимов В. М., Пономарев Л. И. Устройства СВЧ и антенны / под ред. Д. И. Воскресенского. М. : Радиотехника, 2006. 376 с.
2. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. М. : Высш. шк., 1988. 432 с.
3. Якимов А. Н. Условия формирования секторной диаграммы направленности с минимальным уровнем боковых лепестков // Вопросы радиоэлектроники. 1980. Вып. 4. С. 79–80.
4. Якимов А. Н. Исследование помехозащищенности микроволновой антенны с квазисекторной диаграммой направленности // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2019. Т. 1. С. 63–66.
5. Драбкин А. Л., Зузенко В. Л., Кислов А. Г. Антенно-фидерные устройства. М. : Сов. радио, 1974. 536 с.
6. Минкович Б. М., Яковлев В. П. Теория синтеза антенн. М. : Сов. радио, 1969. 296 с.
7. Кюн Р. Микроволновые антенны. Л. : Судостроение, 1967. 518 с.
8. Якимов А. Н. Оптимизация конструкции антенны комбинированным методом // Измерительная техника. 1997. № 10. С. 42–44.
9. Предикатная алгебра выбора в моделировании антенн сложной конфигурации // Надежность и качество сложных систем. 2013. № 1. С. 78–83.
10. Дьяконов В. П., Абраменкова И. В., Круглов В. В. MatLAB 5.3.1 с пакетами расширений / под ред. В. П. Дьяконова. М. : Нолидж, 2001. 880 с.

References

1. Voskresenskiy D.I., Gostyukhin V.L., Maksimov V.M., Ponomarev L.I. *Ustroystva SVCh i antenny = Microwave devices and antennas*. Moscow: Radiotekhnika, 2006:376. (In Russ.)
2. Sazonov D.M. *Antenny i ustroystva SVCh = Antennas and microwave devices*. Moscow: Vyssh. shk., 1988:432. (In Russ.)
3. Yakimov A.N. Conditions for the formation of a sectoral directional pattern with a minimum level of side lobes. *Voprosy radioelektroniki = Radio electronics issues*. 1980;(4):79–80. (In Russ.)
4. Yakimov A.N. Investigation of the noise immunity of a microwave antenna with a quasi-vector radiation pattern. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2019;1:63–66. (In Russ.)
5. Drabkin A.L., Zuzenko V.L., Kislov A.G. *Antenno-fidernye ustroystva = Antenna-feeder devices*. Moscow: Sov. radio, 1974:536. (In Russ.)
6. Minkovich B.M., Yakovlev V.P. *Teoriya sinteza antenn = Theory of antenna synthesis*. Moscow: Sov. radio, 1969:296. (In Russ.)
7. Kyun R. *Mikrovolnovye anteny = Microwave antennas*. Leningrad: Sudostroenie, 1967:518. (In Russ.)
8. Yakimov A.N. Optimization of antenna design by the combined method. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring technique*. 1997;(10):42–44. (In Russ.)
9. Predikatnaya algebra vybora v modelirovanii antenn slozhnoy konfiguratsii. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2013;(1):78–83. (In Russ.)
10. D'yakonov V.P., Abramenkova I.V., Kruglov V.V. *MatLAB 5.3.1 s paketami rasshireniy = MatLAB 5.3.1 with extension packages*. Moscow: Nolidzh, 2001:880. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Николаевич Якимов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры конструирования
и технологий электронных и лазерных средств,
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения
(Россия, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67)
E-mail: y_alder@mail.ru

Alexander N. Yakimov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of construction
and technology of electronic and laser equipment,
Saint Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation
(67 Bolshaya Morskaya street, Saint Petersburg, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /
The author declares no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию/Received 10.01.2024

Поступила после рецензирования/Revised 25.01.2024

Принята к публикации/Accepted 02.02.2024

ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИЕ ФАКТОРЫ И СЛУЧАЙНЫЕ ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ И СИСТЕМ

О. В. Абрамов

Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения
Российской академии наук, Владивосток, Россия
abramov@iacp.dvo.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Выполнен анализ дестабилизирующих факторов и случайных процессов деградации параметров технических устройств и систем как причины параметрических отказов. *Материалы и методы.* Основное внимание уделено синтезу математических моделей, которые целесообразно использовать в рамках функционально-параметрического направления теории надежности. *Результаты и выводы.* Предлагаемые математические модели могут служить основой решения задач управления надежностью и безопасностью сложных систем ответственного назначения.

Ключевые слова: надежность, параметр, математическая модель, прогноз, случайный процесс, мониторинг, техническое состояние

Финансирование: работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки FFW-2021-0003.

Для цитирования: Абрамов О. В. Дестабилизирующие факторы и случайные процессы изменения параметров технических устройств и систем // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 13–20. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-2

DESTABILIZING FACTORS AND RANDOM PROCESSES OF CHANGING PARAMETERS OF ENGINEERING DEVICES AND SYSTEMS

O.V. Abramov

Institute for Automation and Control Processes, Far Eastern Branch
of Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia
abramov@iacp.dvo.ru

Abstract. *Background.* The analysis of destabilizing factors and random processes of degradation of parameters of engineering devices and systems as the causes of parametric failures is carried out. *Materials and methods.* The main attention is paid to the synthesis of mathematical models that are advisable to use within the framework of the functional-parametric direction of reliability theory. *Results and conclusions.* The proposed mathematical models can serve as the basis for solving problems of reliability and safety management of complex systems of responsible purpose.

Keywords: reliability, parameter, mathematical model, forecast, random process, monitoring, technical condition

Financing: the work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science FW-2021-0003.

For citation: Abramov O.V. Destabilizing factors and random processes of changing parameters of engineering devices and systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):13–20. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-2

Введение

Основу методологии функционально-параметрического направления теории надежности (ФП-подхода) составляют методы управления случайными процессами изменения параметров исследуемых технических объектов [1–3]. В соответствии с ФП-подходом процесс функционирования системы и ее техническое состояние в любой момент времени определяются конечным набором некоторых переменных – параметров системы, а отказы есть следствие отклонений параметров от их исходных (номинальных, расчетных) значений. Формой проявления отказа является выход параметров за пределы области допустимых значений (области работоспособности).

Отклонения параметров образуются под влиянием различных факторов, действующих в процессе производства, хранения и эксплуатации, и имеют случайный характер. Поэтому параметры

технических устройств и систем следует рассматривать как некоторые случайные функции времени, закономерности которых (модели случайных процессов изменения параметров) при решении задач анализа и обеспечения надежности должны быть известны.

Математические модели процессов изменения (деградации) параметров

Выбор математической модели случайного процесса изменения параметров представляет собой задачу идентификации, успех решения которой зависит от соотношения двух факторов – объема априорной информации о структуре и параметрах процесса деградации (этот объем определяется степенью изученности процесса) и объема измерительной (апостериорной) информации. Оба вида информации необходимы при синтезе модели, однако играют разные роли. Априорные сведения позволяют определить структуру модели, т.е. ее вид. Эту процедуру обычно называют идентификацией в широком смысле или структурной идентификацией. Задачу определения параметров модели по наблюдениям за процессом при заданной структуре модели обычно называют идентификацией в узком смысле или параметрической идентификацией. Качество решения задач идентификации во многом определяется характером изучаемого процесса.

Отклонения параметров от их расчетных (номинальных) значений обусловлены действием целого ряда факторов, из которых обычно выделяют производственные (технологические) и эксплуатационные.

К технологическим факторам можно отнести дефекты оборудования (неравномерность хода, вибрации, люфты механизмов, неточность шкал), колебания режимов работы, неоднородность исходных материалов, погрешность измерительных инструментов, приборов и т.д. Действие этих факторов приводит к технологическому разбросу параметров, а также некоторому отличию физико-химической структуры элементов, что в процессе эксплуатации может вызвать различие в поведении их параметров.

В процессе хранения и эксплуатации в элементах протекают физико-химические процессы, вызывающие необратимые изменения параметров. Это явление называют старением. Причины старения – диффузия вещества, изменение структуры материала, химические взаимодействия и т.д. Такие процессы могут протекать и при условии изоляции от внешней среды, однако скорость протекания процессов в этом случае существенно уменьшается. Воздействие температуры, влажности, перегрузок (нагрузки) и других внешних факторов ускоряет старение. Наряду со старением в процессе эксплуатации систем имеет место износ, проявляющийся в истирании трущихся механических поверхностей, уменьшении эмиссии электронов с катодов электронных ламп и т.д. Износ также приводит к изменению параметров технических электронных устройств и систем. В результате старения и износа возникают необратимые (накапливающиеся) изменения параметров.

Колебания температуры, влажности, нагрузок и других внешних воздействий могут вызывать сравнительно кратковременные обратимые отклонения параметров.

Изменения параметров технических устройств и систем во времени вследствие процессов старения и износа являются, как правило, достаточно медленными и монотонными. Для случайных процессов старения и износа типичны весьма жесткие связи между значениями параметра в последовательные моменты времени. Каждый тип элемента имеет обычно свою характерную кривую износа (старения); однотипные элементы дают близкие по форме кривые, но с различными параметрами. В связи с этим модели процессов старения обычно выбирают среди случайных процессов, которые имеют определенную функциональную зависимость от времени, а их случайный характер обуславливается случайными параметрами, не зависящими от времени [4–7]. Такие процессы иногда называют детерминированными случайными, квазидетерминированными или полуслучайными [4]. Наиболее распространенной формой моделей случайного процесса необратимых изменений параметров является модель вида

$$X(t) = \sum_{k=0}^N X_k u_k(t), \quad (1)$$

где X_k – случайные величины; $\{u_k(t)\}_{k=0}^N$ – непрерывные детерминированные функции времени. Такое представление можно интерпретировать как разложение случайного процесса по детерминированному базису. В качестве базисных чаще всего используются степенные $\{t^k\}_{k=0}^N$, а также экспоненциальные и логарифмические функции.

Остановимся на моделях вида

$$X(t) = \sum_{k=0}^N X_k t^k. \quad (2)$$

Исследования многих элементов (резисторов, конденсаторов, транзисторов, интегральных схем) показывают, что для большинства реализаций на максимальных интервалах наблюдения выполняется соотношение $(X_3 t^3) / (X_2 t^2) \leq 10^{-2} \div 10^{-3}$. Это позволяет использовать в качестве моделей полиномы второго порядка:

$$X(t) = X_0 + X_1 t + X_2 t^2, \quad (3)$$

где X_0 – начальное значение параметра, распределение которого определяется технологическими (производственными) факторами; X_1 – коэффициент скорости дрейфа параметра; X_2 – коэффициент ускорения дрейфа параметра.

Распространенным типом аппроксимации случайного процесса необратимых изменений параметров вида (2) является линейная аппроксимация

$$X(t) = X_0 + X_1 t. \quad (4)$$

Линейные случайные процессы [4] – очень удобная модель процессов старения и износа. Они достаточно просто описывают основные особенности процессов износа и старения, требуют минимального количества экспериментальных данных и вместе с тем во многих случаях позволяют с достаточной для практики точностью оценить реальные изменения параметров. Такие модели хорошо согласуются с экспериментальными данными, полученными при хранении электрорадиоэлементов. Часто справочные данные о процессах дрейфа параметров отдельных элементов и схем задают только в виде коэффициентов старения (их моментных характеристик или распределений). В этом случае ничего не остается делать, как считать дрейф параметра линейным, и это почти всегда лучше, чем не учитывать его.

Следует отметить, что модель (4) в ряде случаев можно использовать и для описания нелинейных изменений параметров. Реальные нелинейные зависимости можно свести к линейным либо на основе линейно-кусочной аппроксимации, либо соответствующим преобразованием переменных. Например, не редко используемый на практике случай экспоненциального закона изменения параметра, т.е. $X(t) = X_0 \exp\{-X_1(t - t_0)\}$, можно свести к случаю линейного вида, если вместо X использовать новую величину $X' = \ln X$. Моделями такого вида описываются процессы изменения погрешностей измерительных приборов, процессы развития электромиграционных отказов в тонких пленках алюминия, процессы изменения параметров интегральных схем, некоторые процессы износа механических систем и др.

Значительно меньше в настоящее время изучены процессы изменения параметров под воздействием колебаний внешних факторов (обратимые изменения). Имеющиеся экспериментальные данные позволяют предполагать, что процесс обратимых изменений параметра является стационарным с интервалом корреляции значительно меньшим, чем у процесса необратимых изменений параметров. Таким образом, обратимые изменения параметра могут рассматриваться как некоторая высокочастотная (по сравнению с процессами старения или износа) составляющая случайного процесса изменения параметра.

Случайная обратимая составляющая обусловлена флуктуациями температуры, давления, влажности окружающей среды, электрической (или механической) нагрузки, напряжения питания, электромагнитных помех, ядерной радиации и др. Среди этих факторов выделяют обычно температурные воздействия, полагая, что изменение параметров наиболее существенно проявляется под влиянием температурных флуктуаций. На практике обратимые изменения параметров, происходящие под воздействием температуры, обычно учитывают с помощью температурных коэффициентов. Зная диапазон температур, в пределах которого будет эксплуатироваться аппаратура, и температурный коэффициент, можно оценить предельные (или наиболее вероятные, если температурный коэффициент считать случайной величиной) отклонения параметров от номинальных значений, что и делается при расчете допусков аппаратуры и ее точности. С учетом воздействия всех дестабилизирующих факторов случайный процесс изменения параметра можно аппроксимировать выражением

$$Z(t) = X(t) + \Psi(t), \quad (5)$$

где $X(t)$ – нестационарный (обычно монотонный) случайный процесс необратимых изменений параметра; $\Psi(t)$ – стационарный случайный процесс обратимых изменений параметра под воздействием внешних условий.

Случайные процессы $X(t)$ и $\Psi(t)$ обычно полагают статистически независимыми. В пользу такого предположения приводят соображения, связанные с различным характером корреляционных функций этих процессов. При этом в большинстве случаев считают, что отдельные внешние воздействия статистически независимы, а вызываемые ими отклонения незначительны по сравнению с абсолютным значением параметра. При такой модели процесса изменения параметра основной причиной отказа является случайный необратимый дрейф параметра $X(t)$. Влияние обратимой составляющей $\Psi(t)$ может оказаться существенным лишь в непосредственной близости к границам области допустимых изменений параметра.

Если начальное качество технических объектов достаточно однородно (случайный процесс необратимых изменений характеризуется постоянной средней скоростью), а воздействия внешних факторов варьируются в широких пределах, то более подходящей моделью случайных процессов изменения параметров будут, по-видимому, процессы с сильным перемешиванием, т.е. процессы, приращения которых обладают свойством асимптотической независимости. Внешне реализация таких процессов характеризуется тесным переплетением.

Тот факт, что период корреляции процесса $\Psi(t)$ невелик (во много раз меньше, чем процесса необратимых изменений), позволяет в некоторых случаях принимать предположение о некоррелированности $\Psi(t)$. В этом случае модель процесса изменения параметра можно представить в виде

$$Z(t) = X(t) + \Psi_t,$$

где Ψ_t – случайная величина.

Весьма перспективным представляется описание процессов изменения параметров в виде ортогональных канонических разложений [8]. Ортогональные канонические представления случайных процессов являются математическим аппаратом, который дает возможность описания широкого класса случайных процессов. Идея канонического разложения состоит в том, что любой случайный процесс может быть представлен в виде ряда, состоящего из комбинации неслучайных функций и некоторых некоррелированных случайных величин:

$$Z(t) = m_z(t) + \sum_{k=1}^N \lambda_k \phi_k(t), \quad (6)$$

где $m_z(t)$ – детерминированная функция, представляющая собой математическое ожидание случайного процесса $Z(t)$; λ_k – некоррелированные случайные величины, математические ожидания которых равны нулю; $\phi_k(t)$ – неслучайные функции времени, называемые координатными.

Для того, чтобы разложение (6) определяло исследуемый процесс дрейфа параметров, необходимо определить (или задать) коэффициенты λ_k и координатные функции $\phi_k(t)$. Среди представлений случайных процессов вида (6) наибольшее распространение получили канонические разложения В. С. Пугачева и разложения Карунена – Лозва [8]. Основное различие между ними заключается в тех требованиях, которые предъявляются к точности воспроизведения процесса любым заданным числом членов N суммы (6). Разложение Карунена – Лозва обеспечивает минимум среднего квадрата ошибки, усредненной на интервале наблюдения, а разложение В. С. Пугачева – минимум среднеквадратичной ошибки в каждой точке этого интервала.

В настоящее время, несмотря на хорошо развитый математический аппарат канонических представлений, их удобство для компьютерного моделирования и имеющиеся примеры применения результатов канонического представления случайных процессов изменения параметров для прогнозирования надежности [9], широкого распространения при исследовании параметрической надежности такие модели не получили. Основная причина этого – отсутствие необходимых данных о таких моделях в справочной литературе.

Случайные процессы изменения параметров технических объектов обычно считают нормально распределенными. В пользу такого утверждения приводят соображения о механизме образования

нормального закона, который порождается действием большого числа примерно равных по величине факторов, а также статистические данные, полученные в результате испытаний большого числа различных изделий электронной техники и электротехники. Справедливость гипотезы о нормальном распределении параметров подтверждается многолетним опытом исследований в теории точности. Гипотеза о нормальном распределении параметров в наибольшей степени находит подтверждение при экспериментальных исследованиях производственных (технологических) отклонений параметров, по которым накоплен наибольший фактический материал. Технологический разброс параметров определяет распределение случайного процесса дрейфа параметров в начальный момент времени (в сечении $t = 0$). Для монотонных процессов тип начального распределения в первом приближении сохраняется и для любых других временных сечений.

Использование гауссовских случайных процессов в некоторой степени оправдано еще и тем, что нормальный закон распределения содержит максимум энтропии по сравнению с любым непрерывным распределением с той же дисперсией. Следовательно, замена некоторого распределения нормальным не приведет к завышению оценок.

При описании закономерностей производственных и эксплуатационных изменений параметров находят применение также усеченный нормальный закон, логарифмически нормальный, некоторые асимметричные распределения. Имеются сведения, свидетельствующие о том, что при определенных условиях распределения параметров могут быть равномерными или полимодальными.

Марковские модели эксплуатационных вариаций параметров

Одним из видов моделей, которые весьма заманчиво было бы использовать для описания случайных процессов изменения параметров, являются модели непрерывных марковских процессов [10]. Марковские случайные процессы обладают целым рядом полезных свойств, которые следуют из того факта, что для полного описания марковского процесса достаточно двумерного закона распределения. Кроме того, для марковских процессов хорошо развит математический аппарат, что позволяет решать на его основе различные задачи теории надежности.

Если есть достаточные основания считать исследуемый технический объект марковским и известны необходимые характеристики процессов изменения его параметров (например, коэффициенты сноса и диффузии), то определение риска потери его работоспособности сводится к классической для теории непрерывных марковских процессов задаче о недостижении границ. Задача управления не является характерной, однако ее решение принципиальных затруднений не вызывает и может быть получено на основе уравнений Понтрягина или Фоккера – Планка – Колмогорова [10].

Если придать границам области допустимых значений смысл отражающего экрана, то процесс функционирования марковского объекта будет характеризоваться тем, что в момент достижения реализацией границы происходит мгновенное возвращение ее в некоторую случайную точку области допустимых значений. Из этой точки процесс начинается заново, независимо от прошлого. Такая модель может использоваться для описания процесса функционирования восстанавливаемых технических систем с мгновенным восстановлением работоспособности.

Более общим является случай существования конечного времени поглощения на каждой из границ. Очевидно, это время должно быть случайной величиной, что соответствует процессам функционирования восстанавливаемых марковских объектов со случайным временем восстановления работоспособности. Для этого случая известна обобщенная форма записи уравнения Фоккера – Планка – Колмогорова, включающая три дифференциальных уравнения, одно из которых описывает плотность вероятности значений параметра (реализаций), находящихся между границами, а два других характеризуют вероятности пребывания реализаций на обеих границах [10].

На основе моделей непрерывных марковских процессов с отражающими и полупоглощающими границами можно сформулировать и решать задачи управления надежностью и рисками с учетом функции потерь (ущерба, связанного с наступлением рискованного события).

Моделирование процессов изменения параметров технического состояния систем ответственного назначения

Моделирование процессов эксплуатационных изменений параметров особенно важно для объектов ответственного назначения, потеря работоспособности которых связана с большими материальными потерями или катастрофическими последствиями. В большинстве своем это – сложные

системы, изготавливаемые в небольшом числе экземпляров, эксплуатирующиеся в отличающихся условиях и реализующие экстремальные технологии. Стратегия эксплуатации таких систем должна носить индивидуальный и превентивный (упреждающий отказы) характер [11]. Основные трудности при решении задачи синтеза стратегии их эксплуатации связаны с тем, что решение приходится осуществлять для каждого объекта индивидуально, при малых объемах исходной информации (по небольшому набору результатов контроля), и в присутствии помех (ошибок контроля), статистические свойства которых достоверно не известны. В этих условиях целесообразно объединить всю доступную информацию как объективного (статистика, результаты измерений), так и субъективного (экспертного) происхождения, иначе говоря, воспользоваться экспертно-статистическим подходом.

В рамках экспертно-статистического подхода предполагается естественным воспользоваться той же схемой действий, которую обычно называют действиями по аналогии и базируются на тех «прецедентах», что составляют содержание накопленного опыта.

Суть подхода на основе метода аналогов заключается в том, чтобы объединить возможности современной информационной теории с аппаратом методов теории систем с искусственным интеллектом (которыми в данном случае являются различные компьютерные реализации схем действий по аналогии) [12, 13]. Выбор данного подхода оправдан, если к моменту возникновения проблемы моделирования деградации технического состояния уже накоплен определенный опыт решения похожих проблем, возникавших ранее на подобных технических объектах (аналогах). Представление этого опыта в виде прецедентов и его автоматизированная обработка при помощи специализированных программных систем может позволить значительно повысить эффективность результатов.

Решение проблемы принятия решений по прецедентам основано на распознавании текущей проблемной ситуации, информация о которой представлена в виде некоторого образа (прецедента), и поиска похожих образов, содержащихся в хранилище образов (базе прецедентов) с последующей их адаптацией и использованием для решения задачи принятия решений.

Заключение

Накопленная к настоящему времени обширная информация о закономерностях процессов изменения параметров относится главным образом к параметрам элементов технических устройств и систем. Данные об изменениях выходных параметров можно найти только для сравнительно простых объектов. Для сложных систем, как правило, возникают трудности в получении статистических характеристик выходных параметров из опыта эксплуатации, так как для этого необходимо большое количество таких систем и продолжительный опыт их эксплуатации. В этих условиях целесообразным представляется определение статистических характеристик изменения выходных параметров системы на основе известных закономерностей изменения параметров элементов (внутренних параметров) и модели исследуемой системы. Использование математического аппарата преобразования случайных функций детерминированным оператором и методы компьютерного моделирования позволяют во многих случаях получить статистические данные необходимого объема, эквивалентные в достаточной мере испытанию большого числа образцов за длительный промежуток времени.

Приведенный краткий и, естественно, далеко не полный анализ сведений о закономерностях и случайных процессах изменения параметров технических объектов позволяет тем не менее сделать вывод о том, что в настоящее время уже накоплена исходная информация, необходимая для решения задач управления надежностью и безопасностью. Перспективным представляется привлечение экспертно-статистического подхода и метода аналогов к решению проблемы моделирования процессов изменения параметров технического состояния систем ответственного назначения и планирования их эксплуатации.

Список литературы

1. Abramov O., Dimitrov B. Reliability design in gradual failures: a functional-parametric approach // Reliability: Theory & Applications. 2017. Vol. 12, № 4. P. 39–48.
2. Абрамов О. В. Возможности и перспективы функционально-параметрического направления теории надежности // Информатика и системы управления. 2014. № 4. С. 53–66.
3. Абрамов О. В. О функционально-параметрическом направлении теории рисков // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2015. Т. 1. С. 5–6.
4. Дружинин Г. В. Методы оценки и прогнозирования качества. М. : Радио и связь, 1982. 160 с
5. Берман А. Ф. Д. Деградация механических систем. Новосибирск : Наука, 1998. 329 с.

6. Козлова И. Н., Пиганов М. Н., Тюлевин С. В. Математические модели дрейфа функциональных параметров // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12, № 4. С. 668–673.
7. Переверзев Е. С. Об одной модели постепенного отказа // Надежность и контроль качества. 1985. № 1. С. 10–14.
8. Пугачев В. С. Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. М. : Физматгиз, 1962. 884 с.
9. Кудрицкий В. Д. Прогнозирующий контроль радиоэлектронных устройств. Киев : Техника, 1982. 168 с.
10. Тихонов В. И., Миронов М. А. Марковские процессы. М. : Сов. радио, 1977. 488 с.
11. Абрамов О. В. Контроль и прогнозирование технического состояния систем ответственного назначения // Надежность и качество сложных систем 2018. № 4. С. 108–115.
12. Aamodt A., Plaza E. Case-based reasoning: foundational issues, methodological variations, and system approaches // AI Communications. 1994. Vol. 7, № 1. P. 39–59.
13. Абрамов О. В., Назаров Д. А. Методы и средства интеллектуальной поддержки прогноза технического состояния систем ответственного назначения // Информатика и системы управления. 2022. № 4. С. 54–63.

References

1. Abramov O., Dimitrov B. Reliability design in gradual failures: a functional-parametric approach. *Reliability: Theory & Applications*. 2017;12(4):39–48.
2. Abramov O.V. Possibilities and prospects of the functional-parametric direction of reliability theory. *Informatika i sistemy upravleniya = Informatics and control systems*. 2014;(4):53–66. (In Russ.)
3. Abramov O.V. On the functional parametric direction of risk theory. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2015;1:5–6. (In Russ.)
4. Druzhinin G.V. *Metody otsenki i prognozirovaniya kachestva = Methods of quality assessment and forecasting*. Moscow: Radio i svyaz', 1982:160. (In Russ.)
5. Berman A.F.D. *Degradatsiya mekhanicheskikh system = Degradation of mechanical systems*. Novosibirsk: Nauka, 1998:329. (In Russ.)
6. Kozlova I.N., Piganov M.N., Tyulevin S.V. Mathematical models of drift of functional parameters. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2010;12(4):668–673. (In Russ.)
7. Pereverzev E.S. Ob odnoy modeli postepennoy otkaza. *Nadezhnost' i kontrol' kachestva = Reliability and quality control*. 1985;(1):10–14. (In Russ.)
8. Pugachev V.S. *Teoriya sluchaynykh funktsiy i ee primeneniye k zadacham avtomaticheskogo upravleniya = Theory of random functions and its application to automatic control problems*. Moscow: Fizmatgiz, 1962:884. (In Russ.)
9. Kudritskiy V.D. *Prognoziruyushchiy kontrol' radioelektronnykh ustroystv = Predictive control of radio-electronic devices*. Kiev: Tekhnika, 1982:168. (In Russ.)
10. Tikhonov V.I., Mironov M.A. *Markovskie protsessy = Markov processes*. Moscow: Sov. radio, 1977:488. (In Russ.)
11. Abramov O.V. Control and forecasting of the technical condition of responsible purpose systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2018;(4):108–115. (In Russ.)
12. Aamodt A., Plaza E. Case-based reasoning: foundational issues, methodological variations, and system approaches. *AI Communications*. 1994;7(1):39–59.
13. Abramov O.V., Nazarov D.A. Methods and means of intellectual support for forecasting the technical condition of responsible purpose systems. *Informatika i sistemy upravleniya = Informatics and control systems*. 2022;(4): 54–63. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Олег Васильевич Абрамов

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
главный научный сотрудник лаборатории
управления надежностью сложных систем,
Институт автоматизации и процессов управления
Дальневосточного отделения
Российской академии наук
(Россия, г. Владивосток, ул. Радио, 5)
E-mail: abramov@iacp.dvo.ru

Oleg V. Abramov

Doctor of technical sciences, professor,
honored scientist of the Russian Federation,
chief researcher of the laboratory of complex
systems reliability management,
Institute for Automation and Control Processes,
Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences
(5 Radio street, Vladivostok, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /
The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 15.01.2024

Поступила после рецензирования/Revised 27.01.2024

Принята к публикации/Accepted 05.02.2024

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОЛЕТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А. И. Годунов¹, П. С. Суздальцев², А. А. Жежук³,
А. Г. Избасов⁴, А. М. Мухамбетов⁵, Н. К. Юрков⁶

^{1, 6} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

² Филиал Военной академии материально-технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе, Пенза, Россия

³ Главное ракетно-артиллерийское управление, Москва, Россия

^{4, 5} Военный институт сил воздушной обороны, Актобе, Казахстан

¹ godunov@pnzgu.ru, ² suzdal.1990@bk.ru, ³ Zezhuk@mail.ru,

⁴ iag1973@mail.ru, ⁵ suimbayeva@internet.ru, ⁶ yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Применение и актуальность использования беспилотных систем в настоящее время не вызывает никаких сомнений, работа в этом направлении ведется постоянно, соответственно и растут возможности беспилотных аппаратов. *Материалы и методы.* В CAD системе SolidWorks построена и разработана математическая модель квадрокоптера, после чего экспортирована в Simscape Multibody. *Результаты.* Моделирование состояния системы беспилотного летательного аппарата позволяет провести анализ его поведения и учесть такие факторы как, динамика полета с различными степенями свободы, аэродинамические характеристики и другие параметры, влияющие на полет. *Выводы.* Этот метод моделирования системы позволяет анализировать и оценивать работу системы управления квадрокоптером, а также имитировать его полетные характеристики для достижения максимально точного воспроизведения реального полета.

Ключевые слова: квадрокоптер, математическая модель, система управления

Для цитирования: Годунов А. И., Суздальцев П. С., Жежук А. А., Избасов А. Г., Мухамбетов А. М., Юрков Н. К. Математическая модель полета беспилотного летательного аппарата // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 21–30. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-3

MATHEMATICAL MODEL OF FLIGHT AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

A.I. Godunov¹, P.S. Suzdaltsev², A.A. Zhezhuk³,
A.G. Izbasov⁴, A.M. Mukhambetov⁵, N.K. Yurkov⁶

^{1, 6} Penza State University, Penza, Russia

² Branch of the Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khrulev in Penza, Penza, Russia

³ Main Rocket and Artillery Directorate, Moscow, Russia

^{4, 5} Military Institute of Air Defense Forces, Aktobe, Kazakhstan

¹ godunov@pnzgu.ru, ² suzdal.1990@bk.ru, ³ Zezhuk@mail.ru,

⁴ iag1973@mail.ru, ⁵ suimbayeva@internet.ru, ⁶ yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* The application and relevance of the use of unmanned systems currently does not cause any doubt, work in this direction is constantly being carried out, respectively, and the capabilities of unmanned vehicles are growing. *Materials and methods.* In the Simulink/MATLAB environment based on an unmanned aerial vehicle of the quadcopter type, the results of modeling its flight control system are presented. *Results.* A mathematical model of a quadcopter was built and developed in the CAD system of SolidWorks, after which it was exported to Simscape Multibody. The simulation of the quadcopter control system was obtained by exporting it from the developed model in the Simulink environment. *Conclusions.* This control system simulation method allows you to analyze and evaluate the operation of the quadcopter control system, as well as simulate its flight characteristics to achieve the most accurate reproduction of a real flight.

Keywords: quadcopter, mathematical model, control systems

For citation: Godunov A.I., Suzdaltsev P.S., Zhezhuk A.A., Izbasov A.G., Mukhambetov A.M., Yurkov N.K. Mathematical model of flight an unmanned aerial vehicle. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2024;(1):21–30. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-3

Введение

В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БЛА) широко используются по всему миру для различных целей, таких как мониторинг, создание карт, сельское хозяйство, контроль пожароопасных зон, наблюдение за линиями электропередач, логистика и др. БЛА мультироторного типа, особенно популярны благодаря своей простоте конструкции и возможности совершать полеты с различными скоростями и маневрировать. При проектировании БЛА важным этапом является изучение их динамических характеристик, учитывая их конструктивные особенности. Современные инженерные компьютерные системы позволяют проводить процесс проектирования и моделирования полета, перенося проектные параметры из CAD-систем в среды моделирования систем управления. Особый интерес представляют задачи, связанные с обеспечением штатного функционирования БЛА при воздействии внешних факторов. Цель данной статьи заключается в создании математической модели квадрокоптера с использованием CAD-системы *SolidWorks* и связки *Simscape – Simulink* для описания физической модели и алгоритмов управления [1].

Разработка модели и ее трансляция

Разработка и создание модели малогабаритного квадрокоптера производится в CAD-системе *SolidWorks*, которая позволяет определять некоторые параметры модели, влияющие на его динамику, из которых – масса, моменты инерции и т.д. На рис. 1 представлена спроектированная модель малогабаритного квадрокоптера, которая соответствует техническому заданию.



Рис. 1. Модель квадрокоптера, спроектированная в системе *SolidWorks*

Выполняем экспорт этой модели в программный комплекс *Simscape/MATLAB Simulation* (рис. 2).

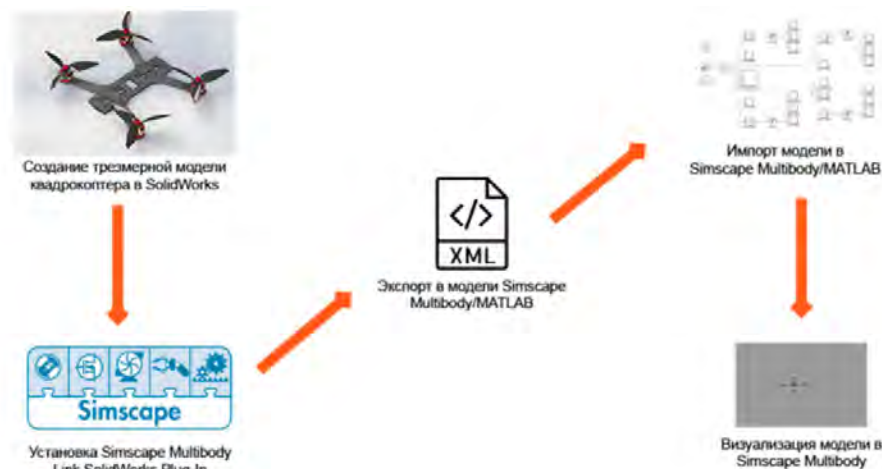


Рис. 2. Алгоритм работы плагина CAD экспорта

Моделирование в системе *Simulink/MATLAB* является сложным процессом из-за определения таких параметров модели, как момент инерции и координат каждого связанного элемента системы. Чтобы решить эту задачу, будем использовать среду *Simscape Multibody*, которая позволяет создавать

трехмерные динамические модели. На рис. 3 представлена трехмерная модель малогабаритного квадрокоптера в среде *Simscape Multibody*.

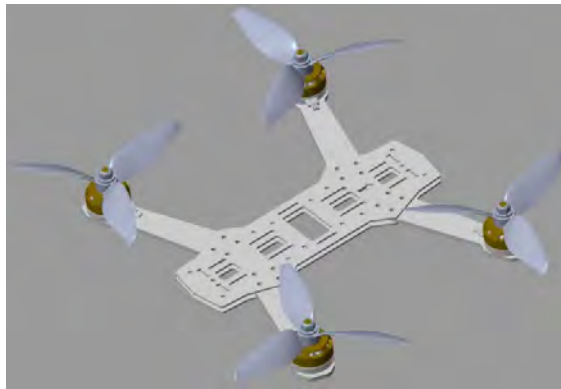


Рис. 3. Экспортированная модель в *Simscape Multibody*

Динамику движения летательных аппаратов в атмосфере определяет ГОСТ 20058-80, который определяет термины, определения, обозначения осей координат и буквенные обозначения величин, относящихся к динамике летательных аппаратов. Движение любого летательного аппарата описывается дифференциальными уравнениями, которые отражают характер изменения сил и моментов, действующих на летательный аппарат. Параметры движения летательного аппарата (скорость, высота, угловое положение) измеряются относительно определенных систем отсчета. Поэтому уравнения движения летательного аппарата могут быть составлены в некоторой системе координат. Систему координат выбирают таким образом, чтобы записываемые в ней уравнения движения имели простой и удобный для моделирования вид [2].

Как правило, применяются четыре прямоугольные системы координат: земная (стартовая), связанная, скоростная, полусвязанная. Оси в данных системах координат располагаются следующим образом: ось Y направляется вертикально вверх, ось X – вперед по продольной оси летательного аппарата, ось Z направляется перпендикулярно плоскости XOY так, чтобы система координат была правой.

Рассматриваемая модель летательного аппарата является квадрокоптером. Это летательный аппарат, как правило, с четырьмя винтами, вращение которых происходит попарно в противоположных направлениях, размещенных на жесткой раме, состоящей из двух лучей, пересекающихся в центре под прямым углом, как показано на рис. 4.

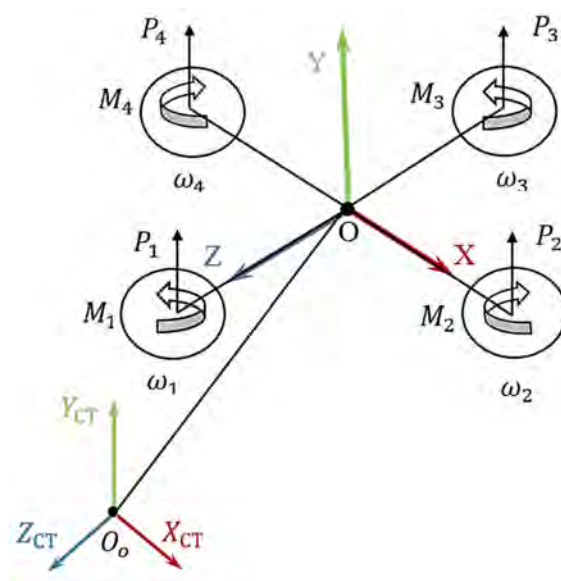


Рис. 4. Кинематическая схема квадрокоптера

Если модель квадрокоптера спроектирована верно, то его центр масс располагается в центре геометрических размеров. Кинематическая схема включает в себя связанную систему координат $OXYZ$, которая неподвижно связана с квадрокоптером, и стартовую (земную) систему координат $O_0, X_{CT}, Y_{CT}, Z_{CT}$. Подъемные силы P_1, P_2, P_3, P_4 и реактивные моменты M_1, M_2, M_3, M_4 возникают от вращения соответствующих винтов с угловыми скоростями $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$. Ориентация квадрокоптера в пространстве определяется углами: рыскания ψ (угол между осью OZ и плоскостью O_0, Y_{CT}, Z_{CT}), тангажа ϑ (угол между осью OX и плоскостью O_0, X_{CT}, Z_{CT}) и крена γ (угол между осью OX и плоскостью O_0, X_{CT}, Y_{CT}).

Система уравнений полета квадрокоптера

Пространственное движение квадрокоптера описывается системой уравнений, в которую входят уравнения поступательного движения центра тяжести, вращательного движения относительно центра тяжести, уравнения связи, кинематические уравнения и уравнения проекции вектора скорости на оси связанной с квадрокоптером системы координат [3].

Уравнения поступательного движения. Эти уравнения центра тяжести квадрокоптера могут быть получены на основе известной из механики теоремы об изменении количества движения:

$$m \frac{d\bar{V}_a}{dt} = \sum \bar{F}, \quad (1)$$

где $\frac{d\bar{V}_a}{dt}$ – ускорение движения квадрокоптера в неподвижной системе координат; $\sum \bar{F}$ – равнодействующая сил, приложенных к квадрокоптеру.

Движение квадрокоптера обычно происходит с вращением относительно центра тяжести с угловой скоростью $\bar{\omega}$ (рис. 5). Поэтому полное абсолютное ускорение $\frac{d\bar{V}_a}{dt}$ состоит из поступательного и переносного ускорений:

$$\frac{d\bar{V}_a}{dt} = \frac{d\bar{V}}{dt} + \bar{\omega} \bar{V}. \quad (2)$$

Теперь теорема об изменении количества движения будет представлена уравнением

$$m \left(\frac{d\bar{V}}{dt} + \bar{\omega} \bar{V} \right) = \sum \bar{F}. \quad (3)$$

Проектируя векторы левой и правой частей этого уравнения на оси связанной системы координат, можно получить следующую систему дифференциальных уравнений движения центра тяжести квадрокоптера:

$$m \left(\frac{dV_{x1}}{dt} + V_{z1}\omega_{y1} - V_{y1}\omega_{z1} \right) = \sum F_{x1}; \quad (4)$$

$$m \left(\frac{dV_{y1}}{dt} + V_{x1}\omega_{z1} - V_{z1}\omega_{x1} \right) = \sum F_{y1}; \quad (5)$$

$$m \left(\frac{dV_{z1}}{dt} + V_{y1}\omega_{x1} - V_{x1}\omega_{y1} \right) = \sum F_{z1}, \quad (6)$$

где m – масса квадрокоптера; V_{x1}, V_{y1}, V_{z1} – проекции вектора скорости $\bar{V}$ центра тяжести квадрокоптера на связанные оси; $\omega_{x1}, \omega_{y1}, \omega_{z1}$ – проекции на связанные оси вектора угловой скорости $\bar{\omega}$ квадрокоптера, а следовательно, и угловой скорости вращения связанной системы относительно земной системы координат; $\sum F_{x1}, \sum F_{y1}, \sum F_{z1}$ – проекции сил, действующих на квадрокоптер, на соответствующие оси связанной системы координат.

Уравнения вращательного движения. Эти уравнения получаются на основе теоремы об изменении кинетического момента:

$$m \frac{d\bar{K}}{dt} = \sum \bar{M},$$

где $\bar{K}$ – вектор кинетического момента; $\sum \bar{M}$ – результирующий вектор моментов, приложенных к квадрокоптеру.

Если выразить вектор $\bar{K}$ через его составляющие, а затем спроектировать векторы $\frac{d\bar{K}}{dt}$ и $\sum \bar{M}$ на оси связанной системы координат (рис. 5), то получим следующую систему уравнений вращательного движения квадрокоптера [4]:

$$I_{x1} \frac{d\omega_{x1}}{dt} + (I_{z1} - I_{y1}) \omega_{y1} \omega_{z1} = \sum M_{x1}; \quad (7)$$

$$I_{y1} \frac{d\omega_{y1}}{dt} + (I_{x1} - I_{z1}) \omega_{z1} \omega_{x1} = \sum M_{y1}; \quad (8)$$

$$I_{z1} \frac{d\omega_{z1}}{dt} + (I_{y1} - I_{x1}) \omega_{x1} \omega_{y1} = \sum M_{z1}, \quad (9)$$

где I_{x1}, I_{y1}, I_{z1} – моменты инерции квадрокоптера относительно связанных осей координат; $\sum M_{x1}, \sum M_{y1}, \sum M_{z1}$ – суммы проекций моментов всех сил на связанные оси.

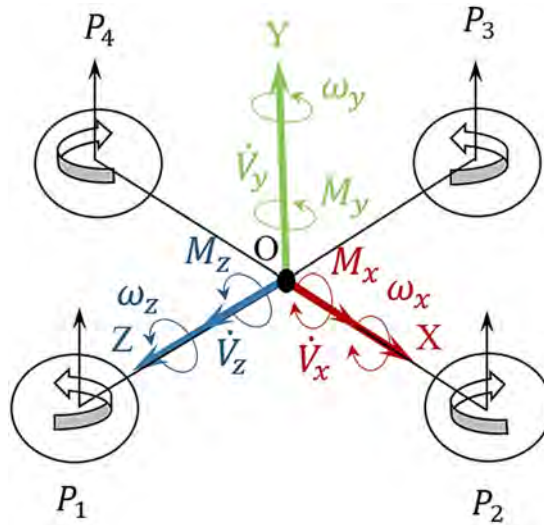


Рис. 5. Поступательные и вращательные движения, создаваемые квадрокоптером в полете относительно осей системы координат

Уравнения связи. Эти уравнения устанавливают связь между производными углов $\frac{d\vartheta}{dt}, \frac{d\gamma}{dt}, \frac{d\psi}{dt}$ и угловыми скоростями квадрокоптера относительно связанной системы координат:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \omega_{z1} \cos \gamma - \omega_{y1} \sin \gamma; \quad (10)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \omega_{x1} - \sin \vartheta \frac{d\psi}{dt}; \quad (11)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{1}{\cos \vartheta} (\omega_{y1} \cos \gamma - \omega_{z1} \sin \gamma). \quad (12)$$

Угловая скорость $\frac{d\vartheta}{dt}$ направлена вдоль проекции оси O_1Z_1 на горизонтальную плоскость. Угловая скорость крена $\frac{d\gamma}{dt}$ определяется проекцией вектора угловой скорости самолета $\bar{\omega}$ на ось O_1X_1 связанной системы координат. Угловая скорость $\frac{d\psi}{dt}$ является проекцией на ось O_0Y_0 земной системы координат (рис 6).

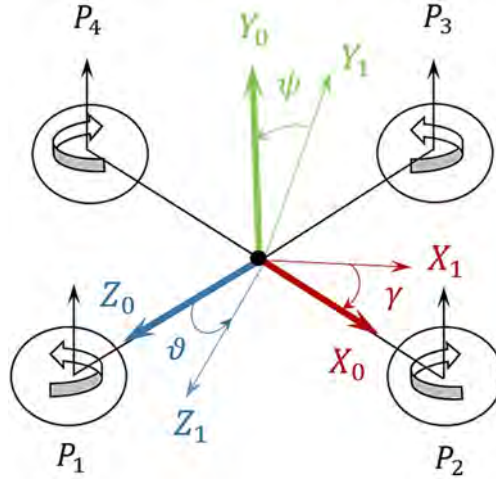


Рис. 6. Схема углов тангажа, крена и рысканья

Кинематические уравнения. Эти уравнения описывают движение центра тяжести квадрокоптера по траектории в системе координат, связанной с Землей. Они устанавливают зависимость вертикальной скорости $\frac{dH}{dt}$, поступательной скорости $\frac{dS}{dt}$ и скорости бокового перемещения квадрокоптера $\frac{dz}{dt}$ от скорости полета V и скорости ветра U :

$$\frac{dH}{dt} = V_y = V \sin \theta_e + U_y; \quad \frac{dS}{dt} = V_x = V \cos \theta_e + U_x; \quad \frac{dz}{dt} = V_z = V \sin \theta_e + U_z,$$

где U_x, U_y, U_z – составляющие вектора скорости ветра U ; V_x, V_y, V_z – проекции вектора скорости на оси земной системы координат.

Уравнение, определяющее зависимость высоты H от скорости полета V при отсутствии вертикального ветра U_y , принимает вид [5]

$$\frac{dH}{dt} = V_y = V \sin \theta_e. \quad (13)$$

Угол наклона траектории в вертикальной плоскости θ_e связан с углами тангажа ϑ , крена γ , атаки α и скольжения β уравнением

$$\sin \theta_e = \cos \alpha \cos \beta \sin \vartheta - \sin \alpha \cos \beta \cos \vartheta \cos \gamma - \sin \beta \sin \gamma \cos \vartheta. \quad (14)$$

Уравнения проекции вектора скорости. Эти уравнения на оси связанной системы координат имеют следующий вид:

$$V_{x1} = V \cos \alpha \cos \beta; \quad (15)$$

$$V_{y1} = V (-\sin \alpha \cos \beta); \quad (16)$$

$$V_{z1} = V \sin \beta. \quad (17)$$

Система уравнений (4)–(17) описывает движение в пространстве неуправляемого квадрокоптера.

Преобразование уравнений полета квадрокоптера к виду, удобному для моделирования

Преобразование уравнений поступательного движения. Для моделирования системы уравнений движения квадрокоптера (4)–(17) необходимо выразить силы и моменты в зависимости от параметров полета. Из уравнений поступательного движения (4)–(6) можно получить уравнения для определения истинной воздушной скорости V , угла атаки α и угла скольжения β . Уравнение истинной воздушной скорости V , т.е. скорости движения квадрокоптера относительно воздушной среды, получается из уравнения (4) проектированием сил, приложенных к квадрокоптеру, на скоростную ось Ox (рис. 7) [6]:

$$m \frac{dV_x}{dt} = \sum F_x. \quad (18)$$

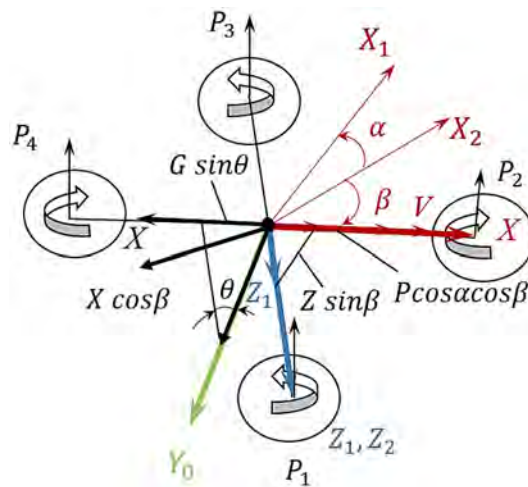


Рис. 7. Проекция сил на скоростную ось Ox

В этом случае составляющая скорости V_x равна истинной воздушной скорости $V_x = V$. Сила тяги P задается в связанной системе координат, проекция силы P на ось Ox есть $P \cos \alpha \cos \beta$. Сила лобового сопротивления X задается в полусвязанной системе координат, проекция этой силы на скоростную ось направлена по отрицательной полуоси X и равна $X \cos \beta$. Сила веса G задается в земной системе координат, ее проекция на ось Ox есть $G \sin \theta$. Боковая аэродинамическая сила задается в полусвязанной системе, ее проекция на скоростную ось Ox есть $Z \sin \beta$. Подъемная сила Y также задается в полусвязанной системе, и ее проекция на ось Ox равна нулю.

С учетом полученных величин проекций сил уравнение можно записать так:

$$\sum F_x = P \cos \alpha \cos \beta - X \cos \beta - Z \sin \beta - G \sin \theta. \quad (19)$$

В уравнении (19) первое слагаемое характеризует тягу двигателя. Если на квадрокоптер установлены четыре двигателя, то общая тяга P равняется сумме тяг:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4.$$

Величина силы лобового сопротивления зависит от скоростного напора и площади крыла:

$$X = C_x \frac{\rho V^2}{2} S,$$

где S – площадь квадрокоптера, m^2 ; $\frac{\rho V^2}{2} = q$ – скоростной напор; C_x – коэффициент лобового сопротивления.

Уравнение для определения угла атаки α получается из уравнения (5) для проекций сил на ось O_1y_1 связанной системы координат (рис. 8):

$$\sum F_{y1} = Y \cos \alpha + X \sin \alpha - G \cos \theta \cos \gamma.$$

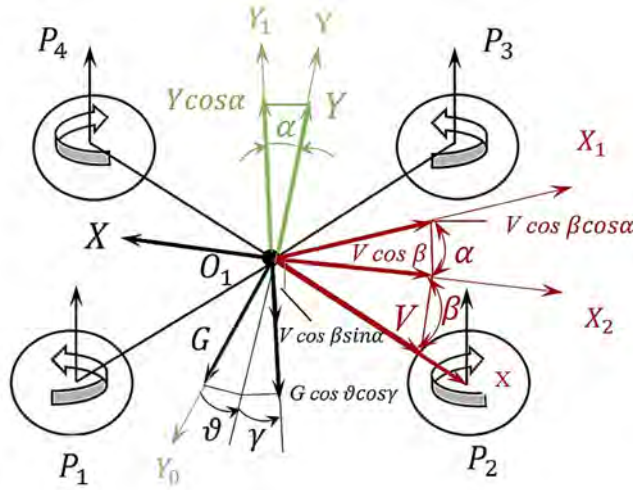


Рис. 8. Проекция сил на скоростную ось O_1y_1

Проекция сил P и Z на эту ось равны нулю; силы Y , X , G проектируются на ось O_1y_1 так же, как и на ось Ox .

Подъемная сила задается в полусвязанной системе координат и определяется по формуле

$$Y = C_y \frac{\rho V^2}{2} S.$$

Уравнение для определения угла скольжения β выводится из уравнения сил (6). На ось z_1 связанной системы координат дают проекции силы Z , G , X (рис. 9). Проекция силы веса равна $G \cos \vartheta \sin \gamma$. Проекция силы сопротивления $X \sin \beta$ мала по сравнению с другими силами и может не учитываться. Проекция сил P и Y на ось z_1 равны нулю. Сумма проекций сил на ось z_1 :

$$\sum F_{z1} = Z + G \cos \vartheta \sin \gamma.$$

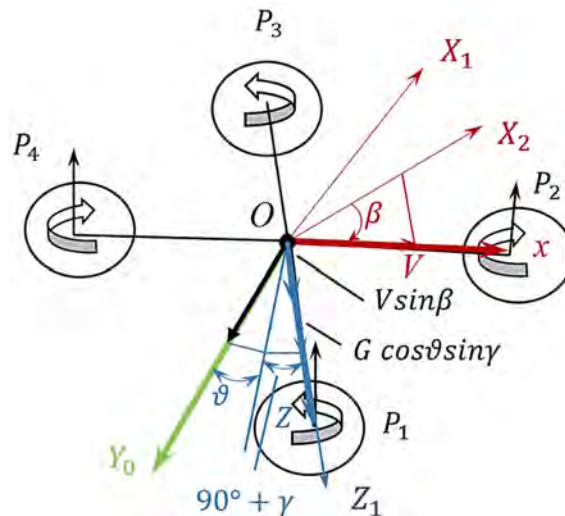


Рис. 9. Проекция сил на скоростную ось Oz_1

Заключение

В данной статье предложен метод объединения твердотельных и динамических компьютерных моделей для проектирования беспилотного летательного аппарата типа квадрокоптер на начальных этапах разработки с использованием программных комплексов *SolidWorks* и *Simscape Multibody*.

Проведенное моделирование состояния системы беспилотного летательного аппарата является важным инструментом для разработки и совершенствования квадрокоптера, которое позволяет провести анализ его поведения и учесть такие факторы, как динамика полета с различными степенями свободы, аэродинамические характеристики и другие параметры, влияющие на полет. Получение достоверной информации способствует их совершенствованию, улучшению и расширению возможностей, а также позволяет оптимизировать управление, улучшить стабильность и автономность полета, оценить производительность системы [7].

Список литературы

1. Мусалимов В. М., Заморуев Г. Б., Калапышина И. И. [и др.]. Моделирование мехатронных систем в среде MATLAB (Simulink / SimMechanics) : учеб. пособие. СПб. : НИУ ИТМО, 2013. С. 114–116.
2. Козорез Д. А., Обрезков И. В., Тихонов К. М., Тишков В. В. Разработка комплексной модели решения вертолетом функциональной задачи // Труды МАИ. 2012. № 62. С. 123–128.
3. Тихонов К. М., Тишков В. В. *SimMechanics Matlab* как средство моделирования динамики сложных авиационных робототехнических систем // Труды МАИ. 2010. № 41. С. 218–222.
4. Дивеев А. И., Конырбаев Н. Б. Управление группой квадрокоптеров методом вариационного аналитического программирования // Труды МАИ. 2017. № 96. С. 112–116.
5. Огольцов И. И., Рожнин Н. Б., Шеваль В. В. Разработка математической модели пространственного полета квадрокоптера // Труды МАИ. 2015. № 83. С. 67–71.
6. Северцев Н. А., Зацаринный А. А. Учет случайности нагрузки и прочности в расчетах надежности конструкций оборонных технических систем для безопасной работы // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 4. С. 90–96.
7. Теличань В. С., Увайсов С. У., Иванов И. А. Влияние ударных воздействий на показатели качества оптических систем посадки самолетов // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. Т. 1. С. 93–100.

References

1. Musalimov V.M., Zamoruev G.B., Kalapyshina I.I. et al. *Modelirovanie mekhatronnykh sistem v srede MATLAB (Simulink / SimMechanics): ucheb. posobie = Modeling of mechatronic systems in MATLAB (Simulink / SimMechanics) : textbook*. Saint Petersburg: NIU ITMO, 2013:114–116. (In Russ.)
2. Kozorez D.A., Obrezkov I.V., Tikhonov K.M., Tishkov V.V. Development of a complex model for solving a functional problem by helicopter. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2012;(62):123–128. (In Russ.)
3. Tikhonov K.M., Tishkov V.V. *SimMechanics Matlab* as a tool for modeling the dynamics of complex aviation robotic systems. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2010;(41):218–222. (In Russ.)
4. Diveev A.I., Konyrbaev N.B. Control of a group of quadcopters by the method of variational analytical programming. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2017;(96):112–116. (In Russ.)
5. Ogol'tsov I.I., Rozhnin N.B., Sheval' V.V. Development of a mathematical model of spatial flight of a quadcopter. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2015;(83):67–71. (In Russ.)
6. Severtsev N.A., Zatsarinnyy A.A. Taking into account the randomness of load and strength in calculations of reliability of structures of defense technical systems for safe operation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(4):90–96. (In Russ.)
7. Telichkan' V.S., Uvaysov S.U., Ivanov I.A. The impact of shock effects on the quality indicators of optical aircraft landing systems. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2018;1:93–100. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Анатолий Иванович Годунов

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
профессор кафедры автоматики и телемеханики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: godunov@pnzgu.ru

Anatoly I. Godunov

Doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
professor of the sub-department
of automation and telemechanics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Павел Сергеевич Суздальцев

адъюнкт,
Филиал Военной академии
материально-технического
обеспечения имени генерала армии
А. В. Хрулева в г. Пензе
(Россия, г. Пенза, Военный городок)
E-mail: suzdal.1990@bk.ru

Андрей Андреевич Жежук

кандидат технических наук,
начальник НТК ГРАУ,
Главное ракетно-артиллерийское управление
(Россия, г. Москва, пер. Козловского, 6)
E-mail: Zezhuk@mail.ru

Аскар Гадылашиевич Избасов

заместитель начальника,
Военный институт сил воздушной обороны
(Казахстан, г. Актобе, ул. Алии Молдагуловой, 39А)
E-mail: iag1973@mail.ru

Асылбек Маратович Мухамбетов

старший офицер отдела связи
и радиотехнического обеспечения,
Военный институт сил воздушной обороны
(Казахстан, г. Актобе, ул. Алии Молдагуловой, 39А)
E-mail: suimbayeva@internet.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

Pavel S. Suzdaltsev

Adjunct,
Branch of the Military Academy
of Logistics named after Army General
A.V. Khrulev in Penza
(Military town, Penza, Russia)

Andrey A. Zhezhuk

Candidate of technical sciences,
head of the NTC GRAU,
Main Rocket and Artillery Directorate
(6 Kozlovsky lane, Moscow, Russia)

Askar G. Izbasov

Deputy head,
Military Institute of the Air Defense Forces
(39A Aliya Moldagulova street, Aktobe, Kazakhstan)

Asylbek M. Mukhambetov

Senior officer of the department of communications
and radio engineering support,
Military Institute of the Air Defense Forces
(39A Aliya Moldagulova street, Aktobe, Kazakhstan)

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 17.01.2024

Поступила после рецензирования/Revised 28.01.2024

Принята к публикации/Accepted 15.02.2024

ПРИЗНАКИ СХОДИМОСТИ И РАСХОДИМОСТИ ИНТЕГРАЛОВ РЕСУРСА НЕВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Г. С. Садыхов¹, С. С. Кудрявцева², В. М. Дубровин³

^{1, 2, 3} Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия
¹ gsadykhov@gmail.com, ² kudryavctva@bmstu.ru, ³ dubrovinvm1934@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* При выборе математической модели надежности невосстанавливаемых технических объектов заранее надо знать условия, при которых средний ресурс конечен и когда бесконечен. Поэтому актуальная задача – найти признаки сходимости и расходимости интегралов ресурса. *Материалы и методы.* В настоящей работе, оценивая средний ресурс через функцию интенсивности отказов невосстанавливаемых технических объектов, найдены достаточные условия сходимости и расходимости интегралов ресурса. *Результаты.* На основе найденных признаков сходимости и расходимости интегралов ресурса невосстанавливаемых технических объектов определены условия ограниченности и неограниченности значений среднего ресурса. *Выводы.* Доказаны достаточные условия сходимости и расходимости интегралов ресурса невосстанавливаемых технических объектов. Приведены примеры использования полученных результатов.

Ключевые слова: средний ресурс, вероятность безотказной работы, интеграл ресурса

Для цитирования: Садыхов Г. С., Кудрявцева С. С., Дубровин В. М. Признаки сходимости и расходимости интегралов ресурса невосстанавливаемых технических объектов // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 31–38. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-4

SIGNS OF CONVERGENCE AND DIVERGENCE OF INTEGRALS OF THE OPERATING LIFE OF NON-RESTORABLE ITEMS

G.S. Sadykhov¹, S.S. Kudryavtseva², V.M. Dubrovin³

^{1, 2, 3} Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
¹ gsadykhov@gmail.com, ² kudryavctva@bmstu.ru, ³ dubrovinvm1934@yandex.ru

Abstract. *Background.* When choosing a mathematical model of reliability of non-recoverable items, it is necessary to know in advance the conditions under which the mean operating life is finite and when it is infinite. Therefore, the actual problem is to find signs of convergence and divergence of operating life integrals. *Materials and methods.* In this paper, estimating the mean operating life through a function of the failure rate of non-recoverable items, sufficient conditions for convergence and divergence of operating life integrals are found. *Results.* On the basis of the found signs of convergence and divergence of integrals of the operating life of non-recoverable items, the conditions of limitation and unlimited values of the mean operating life are determined. *Conclusions.* Sufficient conditions for convergence and divergence of integrals of the operating life of non-recoverable items are proved. Examples of the use of the obtained results are given.

Keywords: mean operating life, conditional probabilities, operating life integrals

For citation: Sadykhov G.S., Kudryavtseva S.S., Dubrovin V.M. Signs of convergence and divergence of integrals of the operating life of non-restorable items. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2024;(1):31–38. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-4

Введение

Пусть ζ – наработка до отказа невосстанавливаемого объекта. Под средним ресурсом объекта будем понимать величину

$$r = E(\zeta),$$

где $E(\zeta)$ – математическое ожидание величины ζ [1].

Доказана следующая формула расчета среднего ресурса объекта [2–4]:

$$r = \int_0^{\infty} P(t) dt, \quad (1)$$

где правая часть – интеграл ресурса; $P(t)$ – вероятность безотказной работы объекта в течение времени t .

Интеграл ресурса не всегда сходится. Например, для распределения наработок до отказа по закону Парето [5, 6]:

$$P(t) = \frac{\beta}{\beta + t},$$

где $\beta > 0$ – постоянная, интеграл ресурса расходится, следовательно, средний ресурс у такого объекта бесконечен, т.е. $r = \infty$.

Тогда возникает задача: найти условия, при которых интеграл ресурса сходится, и условия, при которых он расходится.

Решению этой задачи и посвящается настоящая работа.

Под интенсивностью отказа объекта в момент времени t понимается следующее соотношение [7, 8]:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_r[(t < \zeta < t + \Delta t) / \zeta > t]}{\Delta t},$$

где $P_r[\cdot]$ – вероятность события $(t < \zeta < t + \Delta t)$ при условии $\zeta > t$.

Доказано, что справедлива следующая формула [9–11]:

$$P(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(u) du \right]. \quad (2)$$

Докажем следующее утверждение.

Теорема 1. Пусть функция интенсивности отказов невосстанавливаемого объекта удовлетворяет условию

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda(t) = \Lambda, \quad (3)$$

где $0 < \Lambda < \infty$. Тогда интеграл ресурса невосстанавливаемого объекта сходится.

Доказательство. Из определения предела и условия (3) следует, что для всякого $\varepsilon > 0$ существует такое $T = T(\varepsilon)$, что при

$$t > T \quad (4)$$

выполняется соотношение

$$\Lambda - \varepsilon < \lambda(t) < \Lambda + \varepsilon.$$

Выберем $\varepsilon < \Lambda$ и воспользуемся далее левой оценкой двойного неравенства

$$\lambda(t) > \Lambda - \varepsilon \quad (5)$$

в формуле (2). Тогда при условии (4) имеем

$$P(t) = \exp \left[- \int_0^T \lambda(u) du \right] \cdot \exp \left[- \int_T^t \lambda(u) du \right] = A(T) \exp \left[- \int_T^t \lambda(u) du \right], \quad (6)$$

где $A(T) = \exp \left[- \int_0^T \lambda(u) du \right]$ – постоянная.

Так как согласно неравенству (5)

$$\exp\left[-\int_T^t \lambda(u) du\right] < \exp\left[-\int_T^t (\Lambda - \varepsilon) du\right],$$

то

$$\exp\left[-\int_T^t \lambda(u) du\right] < \exp\left[-(\Lambda - \varepsilon)(t - T)\right].$$

Учитывая это в уравнении (6), получим

$$P(t) < A(T) \exp\left[-(\Lambda - \varepsilon)(t - T)\right]. \quad (7)$$

Далее, используя формулу (1), имеем

$$\int_0^T P(t) dt + \int_T^\infty P(t) dt = B(T) + \int_T^\infty P(t) dt, \quad (8)$$

где $B(T) = \int_0^T P(t) dt$ – постоянная.

Учитывая неравенство (7) в соотношении (8), получим

$$\int_0^\infty P(t) dt < B(T) + A(T) \int_T^\infty \exp\left[-(\Lambda - \varepsilon)(t - T)\right] dt. \quad (9)$$

Делая следующую замену переменных в правом интеграле

$$t - T = u,$$

получим

$$\int_T^\infty \exp\left[-(\Lambda - \varepsilon)(t - T)\right] dt = \int_0^\infty \exp\left[-(\Lambda - \varepsilon)u\right] du = \frac{1}{\Lambda - \varepsilon}.$$

Учитывая это в оценке (9), находим

$$\int_0^\infty P(t) dt < B(T) + \frac{A(T)}{\Lambda - \varepsilon},$$

что доказывает сходимость интеграла ресурса.

Пример 1. Пусть функция интенсивности отказов объекта равна

$$\lambda(t) = a + \frac{1}{1+t},$$

где $0 < a < \infty$ – постоянная. Так как

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda(t) = a,$$

то согласно теореме 1 интеграл (1) сходится. Другими словами, интеграл ресурса конечен.

Покажем этот вывод другим способом: так как

$$P(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(u) du\right] = \exp\left(-\int_0^t a du\right) \exp\left(-\int_0^t \frac{du}{1+u}\right),$$

то

$$P(t) = \frac{e^{-at}}{1+t} < e^{-at}.$$

Следовательно,

$$r = \int_0^{\infty} P(t) dt < \int_0^{\infty} e^{-at} dt = \frac{1}{a},$$

что доказывает сходимость интеграла (1).

Теорема 2. Пусть функция интенсивности отказов невосстанавливаемого объекта удовлетворяет условию

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda(t) = \infty. \quad (10)$$

Тогда интеграл ресурса невосстанавливаемого объекта сходится.

Доказательство. Из определения предела и условия (10) следует, что для всякого $T > 0$ существует такое $E > 0$, что

$$\lambda(t) > E \quad (11)$$

при

$$t > T. \quad (12)$$

Тогда согласно формулам (2) и (12) имеем

$$P(t) = \exp \left[- \int_0^T \lambda(u) du \right] \exp \left[- \int_T^t \lambda(u) du \right].$$

Учитывая оценку (11) во втором интеграле, получим

$$P(t) < A(T) \exp[-E(t-T)],$$

где $A(T)$ – постоянная.

Следовательно,

$$r = \int_0^T P(t) dt + \int_T^{\infty} P(t) dt < B(T) + A(T) \int_T^{\infty} \exp[-E(t-T)] dt, \quad (13)$$

где $B(T) = \int_0^T P(t) dt$ – постоянная.

Так как

$$\int_T^{\infty} \exp[-E(t-T)] dt = \int_0^{\infty} \exp(-Eu) du = \frac{1}{E},$$

то учитывая это в соотношении (13), находим

$$r < B(T) + \frac{A(T)}{E},$$

что доказывает теорему 2.

Пример 2. Пусть функция интенсивности отказов невосстанавливаемого объекта равна

$$\lambda(t) = t.$$

Так как

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda(t) = \infty,$$

то согласно теореме 2 интеграл ресурса сходится.

Покажем это утверждение другим способом: так как

$$\int_0^t \lambda(u) du = \int_0^t u du = \frac{t^2}{2},$$

то, пользуясь формулой Лапласа [12]

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 0,5,$$

находим

$$r = \int_0^\infty e^{-\frac{t^2}{2}} dt = \frac{\sqrt{2\pi}}{2},$$

что доказывает сходимость интеграла (1).

Теорема 3. Пусть функция интенсивности отказов невосстанавливаемого объекта удовлетворяет условию

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda(t) = 0. \quad (14)$$

Тогда интеграл ресурса невосстанавливаемого объекта расходится.

Доказательство. Из определения предела и условия (14) следует, что для всякого $\varepsilon > 0$ существует такое $T = T(\varepsilon)$, что при

$$t > T \quad (15)$$

выполняется соотношение

$$-\varepsilon < \lambda(t) < \varepsilon. \quad (16)$$

Воспользуемся правой частью оценки данного неравенства (16) и условием (15) в формуле (2). Тогда имеем

$$P(t) = \exp \left[-\int_0^T \lambda(u) du \right] \exp \left[-\int_T^t \lambda(u) du \right] > A(T) \exp[-\varepsilon(t-T)], \quad (17)$$

где $A(T) = \exp \left[-\int_0^T \lambda(u) du \right]$ – постоянная.

Далее, используя формулу (1) и оценку (17), получим

$$r = \int_0^T P(t) dt + \int_T^\infty P(t) dt > B(T) + A(T) \int_T^\infty \exp[-\varepsilon(t-T)] dt, \quad (18)$$

где $B(T) = \int_0^T P(t) dt$ – постоянная.

Так как при $t - T = u$

$$\int_T^\infty \exp[-\varepsilon(t-T)] dt = \int_0^\infty \exp[-\varepsilon u] du = \frac{1}{\varepsilon},$$

то, учитывая это в уравнении (18), находим

$$\int_0^\infty P(t) dt > B(T) + \frac{A(T)}{\varepsilon}.$$

Поскольку левая часть не зависит от ε , то, устремив ε к нулю, получим

$$\int_0^{\infty} P(t) dt \geq \infty.$$

Откуда следует, что интеграл ресурса расходится, что и доказывает теорему 3.

Пример 3. Пусть вероятность безотказной работы невосстанавливаемого объекта в течение времени t равна

$$P(t) = \frac{1}{1+t}.$$

Тогда, используя формулу расчета функции интенсивности отказов, найдем [13–15]

$$\lambda(t) = -\frac{P'(t)}{P(t)} = \frac{1}{1+t}.$$

Так как

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda(t) = 0,$$

то, согласно теореме 3, интеграл ресурса расходится.

Обсуждение. В работе найдены достаточные условия сходимости и расходимости интеграла ресурса невосстанавливаемых технических объектов. Найденные условия определяются на основе асимптотических значений интенсивности отказов. Использование этих условий в практических задачах позволяет найти наиболее адекватную математическую модель надежности при любом законе распределения ресурса невосстанавливаемых объектов [16].

Заключение

В настоящей работе найдены признаки сходимости и расходимости интегралов ресурса невосстанавливаемых технических объектов. Найденные признаки определяются на основе асимптотических значений интенсивности отказов.

Приведены примеры использования найденных признаков.

Список литературы

1. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы в теории надежности и их статистический анализ. М. : URSS, 2013. 584 с.
2. Михайлов В. С., Юрков Н. К. Интегральные оценки в теории надежности. Введение и основные результаты. М. : Техносфера, 2020. 148 с.
3. Садыхов Г. С., Кудрявцева С. С. Расчет и оценка среднего остаточного ресурса невосстанавливаемых объектов в зависимости от заданного уровня безотказности // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2022. № 2. С. 13–22. doi: 10.31857/S0235711922020134
4. Садыхов Г. С., Савченко В. П., Сидняев Н. И. Модели и методы оценки остаточного ресурса изделий радиоэлектроники. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2015. 382 с.
5. Петушков В. А. К прогнозированию остаточного ресурса конструкций с повреждениями, подвергаемых в эксплуатации ударным воздействиям // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2020. № 3. С. 91–105. doi: 10.31857/S023571192002011X
6. Северцев Н. А., Юрков Н. К., Нгуен К. Т. Показатель «средний остаточный срок утилизации технических объектов» и его свойства // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2019. Т. 1. С. 202.
7. Hoeffding W. Probability inequalities for sums of bounded random variables // Journal of the American Statistical Association. 1963. № 58. P. 13–30.
8. Садыхов Г. С., Кузнецов В. И. Методы и модели оценок безопасности сверхназначенных сроков эксплуатации технических объектов. М. : URSS, 2007. 144 с.
9. Артюхов А. А. Оценки средней наработки до отказа при частых срабатываниях // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2015. № 18. С. 295–297.
10. Димитриенко Ю. И., Юрин Ю. В., Европин С. В. Прогнозирование долговечности и надежности элементов конструкций высокого давления. Часть 1. Численное моделирование накопления повреждений // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2013. № 11. С. 3–11.

11. Pavlov I. V., Razgulyaev S. V. Calculation of the basic reliability parameters for the model of a system with dual redundancy in different subsystems // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2020. Vol. 49, № 10. P. 829–835. doi: 10.3103/S1052618820100076
12. Pavlov I. V. Confidence limits for system reliability indices with increasing function of failure intensity // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2017. Vol. 46, № 2. P. 149–153. doi: 10.3103/S1052618817020133
13. Sidnyaev N. I. Methods for calculating the influence of the electrodynamic field in the ionosphere on a spacecraft // *Cosmic Research*. 2022. Vol. 60, № 3. P. 165–173. doi: 10.1134/S001095252202006X
14. Sidnyaev N. I., Butenko I. I., Bolotova E. E. Statistical and linguistic decision-making techniques based on fuzzy set theory // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020. Vol. 1127 AISC. doi: 10.1007/978-3-030-39216-1_16
15. Belyaev Y. K., Hajiyeu A. H. Mathematical models of systems with several lifts and various control rules // *Reliability: Theory and Applications*. 2020. Vol. 15, № 2. P. 21–35. doi: 10.24411/1932-2321-2020-12002
16. Северцев Н. А., Зацаринный А. А. Учет случайности нагрузки и прочности в расчетах надежности конструкций оборонных технических систем для безопасной работы // *Надежность и качество сложных систем*. 2017. № 4. С. 90–96.

References

1. Gnedenko B.V., Belyaev Yu.K., Solov'ev A.D. *Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti i ikh statisticheskiy analiz = Mathematical methods in reliability theory and their statistical analysis*. Moscow: URSS, 2013:584. (In Russ.)
2. Mikhaylov V.S., Yurkov N.K. *Integral'nye otsenki v teorii nadezhnosti. Vvedenie i osnovnye rezul'taty = Integral estimates in reliability theory. Introduction and main results*. Moscow: Tekhnosfera, 2020:148. (In Russ.)
3. Sadykhov G.S., Kudryavtseva S.S. Calculation and assessment of the average residual resource of non-recoverable objects depending on a given level of reliability. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin = Problems of mechanical engineering and reliability of machines*. 2022;(2):13–22. (In Russ.). doi: 10.31857/S0235711922020134
4. Sadykhov G.S., Savchenko V.P., Sidnyaev N.I. *Modeli i metody otsenki ostatochnogo resursa izdeliy radioelektroniki = Models and methods for estimating the residual life of radioelectronics products*. Moscow: Izd-vo MGUTU im. N.E. Bauman, 2015:382. (In Russ.)
5. Petushkov V.A. To predict the residual life of structures with damage exposed to shock in operation. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin = Problems of mechanical engineering and machine reliability*. 2020;(3):91–105. (In Russ.). doi: 10.31857/S023571192002011X
6. Severtsev N.A., Yurkov N.K., Nguen K.T. The indicator "average residual period of utilization of technical facilities" and its properties. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2019;1:202. (In Russ.)
7. Hoeffding W. Probability inequalities for sums of bounded random variables. *Journal of the American Statistical Association*. 1963;(58):13–30.
8. Sadykhov G.S., Kuznetsov V.I. *Metody i modeli otsenok bezopasnosti sverkhnaznachennykh srokov ekspluatatsii tekhnicheskikh ob'ektov = Methods and models of safety assessments of over-designated service life of technical facilities*. Moscow: URSS, 2007:144. (In Russ.)
9. Artyukhov A.A. Estimates of the average operating time to failure with frequent triggers. *Novye informatsionnye tekhnologii v avtomatizirovannykh sistemakh = New information technologies in automated systems*. 2015;(18): 295–297. (In Russ.)
10. Dimitrienko Yu.I., Yurin Yu.V., Evropin S.V. Forecasting the durability and reliability of high-pressure structural elements. Part 1. Numerical simulation of damage accumulation. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie = Proceedings of higher educational institutions. Mechanical engineering*. 2013;(11):3–11. (In Russ.)
11. Pavlov I.V., Razgulyaev S.V. Calculation of the basic reliability parameters for the model of a system with dual redundancy in different subsystems. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2020;49(10):829–835. doi: 10.3103/S1052618820100076
12. Pavlov I.V. Confidence limits for system reliability indices with increasing function of failure intensity. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2017;46(2):149–153. doi: 10.3103/S1052618817020133
13. Sidnyaev N.I. Methods for calculating the influence of the electrodynamic field in the ionosphere on a spacecraft. *Cosmic Research*. 2022;60(3):165–173. doi: 10.1134/S001095252202006X
14. Sidnyaev N.I., Butenko I.I., Bolotova E.E. Statistical and linguistic decision-making techniques based on fuzzy set theory. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2020;1127 AISC. doi: 10.1007/978-3-030-39216-1_16
15. Belyaev Y.K., Hajiyeu A.H. Mathematical models of systems with several lifts and various control rules. *Reliability: Theory and Applications*. 2020;15(2):21–35. doi: 10.24411/1932-2321-2020-12002
16. Severtsev N.A., Zatsarinnyy A.A. Taking into account the randomness of load and strength in calculations of reliability of structures of defense technical systems for safe operation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(4):90–96. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Гулам Садых оглы Садыхов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры вычислительной математики
и математической физики, главный научный сотрудник,
Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1)
E-mail: gsadykhov@gmail.com

Светлана Сергеевна Кудрявцева

старший преподаватель кафедры вычислительной
математики и математической физики,
Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1)
E-mail: kudryavctva@bmstu.ru

Виктор Митрофанович Дубровин

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры вычислительной математики
и математической физики,
Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1)
E-mail: dubrovinvm1934@yandex.ru

Gulam S. Sadykhov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of computational
mathematics and mathematical physics, chief researcher,
Bauman Moscow State Technical University
(building 1, 5 2nd Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Svetlana S. Kudryavtseva

Senior lecturer of the sub-department of computational
mathematics and mathematical physics, Bauman
Moscow State Technical University
(building 1, 5 2nd Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

Viktor M. Dubrovin

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of computational mathematics and mathematical physics,
Bauman Moscow State Technical University
(building 1, 5 2nd Baumanskaya street,
Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 22.12.2023

Поступила после рецензирования / Revised 19.01.2024

Принята к публикации / Accepted 15.02.2024

О МЕТОДАХ ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ ПРОЕКТИРУЕМОЙ АЭС ПРИ ОБЪЕДИНЕНИИ ДАННЫХ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ИСТОЧНИКОВ

В. Б. Морозов¹, М. А. Морозова²

¹ АО «Атомэнергoproject», Москва, Россия

² Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

¹ morozov_vb@aep.ru, ² mar@bmstu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Для получения разрешения на строительство и ввод в эксплуатацию блоков АЭС требуется представить в Ростехнадзор вероятностный анализ безопасности спроектированного блока. Оценки интенсивностей отказов элементов такого блока могут быть получены только на основе объединения эксплуатационной информации по действующим блокам-аналогам. Указанная задача требует разработки специальных методов, учитывающих неоднородность объединяемых данных. *Материалы и методы.* Одним из возможных подходов к решению данной задачи является применение эмпирического байесовского метода, в котором предполагается наличие некоторого первичного распределения интенсивностей отказов объединяемых групп элементов, параметры которого вычисляются по максимуму безусловной функции правдоподобия. Зная оценки параметров распределения, можно получить оценки параметров объединенной выборки. *Результаты.* Предложенная методика и реализующая ее программа позволили учесть фактор неопределенности при объединении данных в рамках модели Пуассона, предполагающей постоянство интенсивностей отказов. Результаты ее применения использованы при разработке вероятностного анализа безопасности проектируемых блоков. *Выводы.* Объединение данных по надежности однотипных элементов действующих блоков АЭС должно выполняться с учетом их потенциальной неоднородности. Предложенная методика позволяет решить данную задачу, предотвращая необоснованное занижение фактора неопределенности оценок, характерное для простого суммирования данных.

Ключевые слова: вероятностный анализ безопасности, интенсивность отказов, объединение информации, неоднородность данных, эмпирический байесовский метод, метод максимума правдоподобия

Для цитирования: Морозов В. Б., Морозова М. А. О методах оценки интенсивности отказов оборудования для вероятностного анализа безопасности проектируемой АЭС при объединении данных от различных источников // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 39–48. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-5

ON METHODS FOR ASSESSING EQUIPMENT FAILURE RATES FOR PROBABILISTIC SAFETY ANALYSIS OF NUCLEAR POWER PLANTS AT DESIGN STAGE WHEN POOLING DATA FROM VARIOUS SOURCES

V.B. Morozov¹, M.A. Morozova²

¹ JSC Atomenergoproekt, Moscow, Russia

² Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

¹ morozov_vb@aep.ru, ² mar@bmstu.ru

Abstract. *Background.* To obtain permission to construct and commission NPP units, it is necessary to submit a probabilistic safety analysis (PSA) of the designed unit to Rostekhnadzor. Estimates of component failure rates of such unit can only be obtained based on pooling operational data from operating analogues. This task requires the development of special methods that consider the non-homogeneity of the pooled data. *Materials and methods.* One of the possible approaches to solving this problem is the use of the empirical Bayesian method, which assumes the presence of some primary distribution of failure rates of combined groups of components, which parameters are calculated from the maximum of the unconditional likelihood function. Knowing the estimates of the distribution parameters, it is possible to obtain estimates of the parameters of the combined sample. *Results.* The proposed methodology and the program that implements it made it possible to consider the uncertainty factor when pooling data on the basis of the Poisson model, which assumes constant failure rates. The results of its application were used in the development of PSA of the designed units. *Conclusions.* Pooling the reliability data of similar type components from operating NPP units should

be carried out considering their potential non-homogeneity. The proposed methodology allows to solve this problem, preventing unreasonable underestimation of the uncertainty factor, which is typical for simple summation of failure data.

Keywords: probabilistic safety analysis, failure rate, pooling failure data, data non-homogeneity, empirical Bayesian method, maximum likelihood method

For citation: Morozov V.B., Morozova M.A. On methods for assessing equipment failure rates for probabilistic safety analysis of nuclear power plants at design stage when pooling data from various sources. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):39–48. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-5

Введение

Общеизвестной проблемой при разработке вероятностного анализа безопасности (ВАБ) является проблема качества исходных данных – интенсивностей (частот) исходных событий и параметров надежности оборудования [1]. Данная практическая проблема имеет в том числе научно-методический аспект.

Его суть состоит в том, что оборудование АЭС выпускается малыми сериями и является высоконадежным. При этом оно эксплуатируется в составе разных систем и при различных условиях, может при одинаковом назначении отличаться по конструктивному исполнению и т.д., т.е. статистические выборки, построенные для однородных групп оборудования, включают крайне малое количество событий [2, 3]. Частным случаем такой проблемы является получение оценок показателей надежности для проектируемого блока при полном отсутствии специфической для этого блока эксплуатационной информации. Следовательно, классические методы обработки статистической информации, основанные на предположении принадлежности выборочных данных одной генеральной совокупности, в этих условиях непригодны. Более подходящим для решения данных задач является байесовский подход, в нем параметры надежности представляются случайными величинами, которым приписывается некоторое начальное (априорное) распределение, которое затем может уточняться на основе результатов наблюдений с использованием формулы Байеса [4, 5]:

$$f(a|X) = \frac{P(X|a) f_0(a)}{P(X|a) \int f_0(a) da} = CP(X|a) f_0(a), \quad (1)$$

где $f_0(a)$ представляет некоторую исходную плотность распределения параметра, известную до опыта (априорную плотность); $P(a|X)$ – функция правдоподобия (вероятность наступления события X , если параметр принимает значение a), которая предполагается неизменной; $f(a|X)$ – плотность распределения этого же параметра после опыта или наблюдения, если известно о имевшем место событии X в его результате (апостериорная плотность); C – постоянная, представляющая нормирующий множитель.

Одной из разновидностей методов, использующих данный прием, является использование для указанного распределения эксплуатационной информации по объектам-аналогам (эмпирический байесовский подход [2, 3]). Его положительным свойством является возможность использования всего имеющегося ансамбля эксплуатационных данных, в равной степени релевантных для оцениваемой группы элементов, при этом требование однородности (т.е. принадлежности данных групп используемых источников к одной генеральной совокупности) не является обязательным.

О качестве байесовских оценок

Для более детального описания проблемы необходимо ввести понятие группы однородности как совокупности элементов, для которых допущение об одинаковости показателей надежности может быть принято без статистических обоснований, т.е. на основании общего инженерного вывода.

На практике считается обоснованным относить к таким группам одинаковые по типу и назначению элементы, расположенные на одинаковых технологических позициях в разных каналах одной системы АЭС. Такие элементы, как правило, изготовлены на одном предприятии и имеют общую историю эксплуатации. Дополнительным аргументом в пользу формирования таких групп является тот факт, что допущение об одинаковости значений их показателей надежности применительно к резервированным элементам каналов систем безопасности обеспечивает запас (консервативность) при расчете показателей надежности систем.

В рамках таких групп однородности число отказов крупного тепломеханического оборудования (например, насосных агрегатов) за обозримый период наблюдения может оказаться достаточным для получения качественных статистических оценок. Однако для оборудования с более высокими показателями безотказности (например, клапанов) и в этом случае отказы будут носить единичный характер. Обоснованно судить об уровне надежности элементов в такой ситуации невозможно.

Из сказанного следует следующий вывод: в большинстве случаев использование дополнительной информации необходимо, и его целью должно быть повышение статистического качества оценок. Из теории математической статистики известны следующие критерии качества оценок [5]:

- состоятельность;
- несмещенность;
- эффективность.

Указанные критерии характеризуют исключительно применяемый математический метод оценивания и не соотносятся с имеющейся статистической базой. При решении задач инженерной практики (например, разработки ВАО) в рамках эмпирического байесовского подхода критерии качества оценок должны учитывать как релевантность привлекаемой базы, так и обоснованность методов ее анализа.

При оценке интенсивностей отказов оборудования эксплуатирующихся блоков АЭС по методу Байеса часто применяют так называемые неинформативные априорные распределения, например, несобственное гамма-распределение Джеффриса [7].

Однако в случае малого числа наблюдаемых событий полученный результат не будет стабильным при небольших изменениях исходных данных, так как на длительном периоде наблюдений случайный пропуск одного события весьма вероятен, при этом он может существенно повлиять на результат оценки. Применение же неинформативных распределений в формуле Байеса с суммированием всей доступной информации по отказам и наработкам оборудования из разных источников без учета неоднородности объединяемых данных существенно занижает параметр неопределенности оценок. С учетом сказанного приходим к следующим критериям:

1. Метод выбора/оценки параметров априорного распределения при эмпирическом байесовском подходе должен базироваться на использовании методов теории вероятности и математической статистики (выполняются статистические критерии [5]).
2. Априорное распределение не должно приводить к неоправданно оптимистическим оценкам, завышающим надежность либо понижающим неопределенность применяемых оценок (принцип консерватизма [1]).
3. Результат оценивания параметров не должен существенно изменяться при увеличении на единицу числа отказов в любой группе, используемой при построении априорного распределения (отсутствие порогового эффекта [3]).

Количественным показателем эффективности информационной базы, применяемой при конструировании априорного распределения, является также отношение верхней 95 % границы оцениваемого показателя к его средней величине либо к медиане (коэффициент ошибки).

Таким образом, привлечение дополнительной эксплуатационной информации будет полезным, когда оно позволит повысить качество оценок в сравнении с оценками, полученными без ее учета.

Основные допущения

Не затрагивая вопрос применимости модели потока Пуассона к описанию наблюдаемой при эксплуатации АЭС статистики по исходным событиям и отказам оборудования, далее предположим, что данная модель применима в обоих случаях.

Время (наработка) между двумя последовательными событиями в таком потоке подчиняется экспоненциальному закону, характеризующему постоянной интенсивностью отказов, которая подлежит оценке. В данной задаче оценка интенсивности отказов выполняется для группы однотипного оборудования проектируемой АЭС, когда специфическая для объекта анализа информация по отказам отсутствует в принципе, т.е. когда оценивание выполняется непосредственно на основе данных от блоков-аналогов.

Для ее решения требуется определить ансамбль объединяемых данных и разработать математический аппарат построения обобщенного распределения, учитывающий их потенциальную неоднородность.

Материалы и методы

Рассмотрим задачу оценки интенсивности отказов для группы однотипного оборудования на проектируемом блоке АЭС.

Пусть имеется K различных источников эксплуатационных данных или K групп источников с одинаковыми параметрами надежности в рамках каждой группы. Данные каждого имеющегося в распоряжении источника (или группы источников) представляются в виде (r_i, T_i) , где r_i – количество событий (отказов элементов или исходных событий), а T_i – совокупная наработка элементов в группе. Распределение числа отказов в этом случае таково:

$$P(r_i, T_i) = \frac{(\lambda_i T_i)^{r_i}}{r_i!} e^{-\lambda_i T_i}, \quad r = 0, 1, \dots \quad (2)$$

Показатели надежности однотипного оборудования на эксплуатирующихся блоках-аналогах могут отличаться в силу различных условий, например, связанных с наличием модернизаций, особенностями организации ремонтов на разных АЭС и др., но при этом информация от них может быть в равной степени релевантна в отношении рассматриваемого нового блока. В этой ситуации необходимо учесть весь объем данных.

В рамках байесовского подхода для этого выполняется конструирование некоторого обобщенного распределения случайной величины Λ , соответствующей искомому параметру λ и зависящей от результатов наблюдений (случайная величина здесь представлена заглавной буквой, а оценка параметра – прописной буквой с тильдой наверху). Байесовскими оценками при этом являются оценки математического ожидания и дисперсии:

$$\hat{\lambda} = E[\Lambda], \quad \hat{V}_{ar} = E[\Lambda^2] - (E[\Lambda])^2, \quad (3)$$

где E обозначает математическое ожидание, а $\hat{\lambda}$ и $\hat{V}_{ar}$ – оценки математического среднего и дисперсии Λ .

На практике оценки моментов распределения Λ получаются с помощью специальных методов, а вид распределения выбирается с тем, чтобы распределение было сопряжено с функцией правдоподобия для совокупно наблюдаемого результата эксплуатации.

Задача получения оценок (3) может быть решена в рамках подхода, в котором предполагается наличие некоторого общего для всех групп данных исходного материнского распределения интенсивностей отказов, порождающего ряд значений интенсивностей отказов отдельных групп элементов, которые, в свою очередь, реализуются в виде наблюдаемого количества отказов и наработок. Основные идеи такого подхода рассмотрены в ряде публикаций [6, 8]. В настоящей статье представлено углубленное и систематическое изложение метода, развивающее идеи [6].

В соответствии с принятой моделью параметрам безотказности компонентов групп λ_i соответствуют Λ_i , которые являются независимыми случайными величинами с некоторым общим средним m и дисперсией V :

$$E[\Lambda_i] = m, \quad V_{ar}[\Lambda_i] = E[\Lambda_i^2 - m^2] = V. \quad (4)$$

Учитывая это модельное допущение, возможно получить оценку параметров в уравнении (3), используя информацию от всех рассматриваемых групп.

Обоснование применения такого подхода состоит в том, что в силу подбора групп-аналогов математическое среднее по общей совокупности данных полагается стабильной характеристикой, которая может использоваться в качестве среднего значения интенсивности отказов элементов на новом блоке. При этом мера неопределенности в виде дисперсии (4) должна учитывать вариативность параметров между рассматриваемыми группами. Так, дисперсия (4) должна оставаться конечной, независимо от числа рассматриваемых групп, наработок и количеств отказов элементов в группах.

Наилучшую оценку $\hat{m}$ для математического ожидания материнского распределения интенсивности отказов можно получить в классе линейных оценок максимума правдоподобия. Общий вид таких оценок следующий:

$$\hat{m} = \sum_{i=1}^K w_i \frac{r_i}{T_i}. \quad (5)$$

Чтобы оценка (3) была несмещенной, должно выполняться $\sum_{i=1}^K w_i = 1$. Действительно, переходя к условному математическому ожиданию, получим

$$E[\hat{m}] = E\left[\sum_{i=1}^K w_i \left[E\left[\frac{r_i}{T_i} \middle| \Lambda_i\right]\right]\right] = E\left[\sum_{i=1}^K w_i \Lambda_i\right] = m \left(\sum_{i=1}^K w_i\right), \quad (6)$$

где вертикальная черта и параметр правее обозначают условие.

Таким образом, для $E[\Lambda] = m$ необходимо $\sum_{i=1}^K w_i = 1$.

Оптимальные значения w_i , обеспечивающие эффективность оценки в классе всех линейных оценок, получаются при минимизации квадратичной формы от w_i^2 для второго момента $V_{ar}[\hat{m}]$ при ограничении $\sum_{i=1}^K w_i = 1$:

$$V_{ar}[\hat{m}] = E\left[\sum_{i=1}^K w_i^2 E\left[\frac{r_i^2 | \lambda_i - m^2 T_i^2}{T_i^2}\right]\right] = E\sum_{i=1}^K w_i^2 E\left[\lambda_i^2 + \frac{\lambda_i}{T_i} - m^2\right] = \sum_{i=1}^K w_i^2 \left(V + \frac{m}{T_i}\right). \quad (7)$$

Очевидно, что в точке минимума w_i должны быть обратно пропорциональны коэффициентам при квадратичной форме (в этом случае достигается коллинеарность градиента (7) и нормали к гиперплоскости $\sum_{i=1}^K w_i = 1$). При этом оптимальные значения w_i будут равны

$$w_{opti} = \frac{\frac{1}{V + \frac{m}{T_i}}}{\sum_{i=1}^K \frac{1}{V + \frac{m}{T_i}}}. \quad (8)$$

Соответственно, минимальное значение дисперсии оценки $\hat{m}$:

$$V_{ar}[\hat{m}] = \frac{1}{\sum_{i=1}^K \frac{1}{V + \frac{m}{T_i}}}. \quad (9)$$

Заметим, что $V_{ar}[\hat{m}]$ характеризует исключительно качество оценки $\hat{\lambda} = \hat{m}$ (средней величины λ по всей популяции) и не связано с вопросом оценки параметра неопределенности распределения $V_{ar}[\Lambda]$.

Перейдем к задаче оценки этого параметра. Очевидно, что для получения оценок данной дисперсии необходимо наряду с неопределенностью, обусловленной вариативностью параметров групп, учесть дополнительный источник неопределенности, связанный с использованием статистик $\hat{\lambda}_i = \frac{r_i}{T_i}$ вместо неизвестного точного значения λ_i . Рассмотрим различные способы оценки дисперсии в указанных условиях. Будем искать оценку дисперсии в виде взвешенной суммы дисперсий в отдельных группах с некоторыми весовыми коэффициентами:

$$V_{ar}[\Lambda] = E\left[\sum_{i=1}^K w_i E\left[\frac{r_i^2 | \lambda_i - m^2 T_i^2}{T_i^2}\right]\right] = E\sum_{i=1}^K w_i E\left[\lambda_i^2 + \frac{\lambda_i}{T_i} - m^2\right] = V + \sum_{i=1}^K w_i \frac{m}{T_i}. \quad (10)$$

Смысл данной формулы состоит в том, что подлежащая оценке группа однородности нового блока может быть соотнесена с любой из учитываемых групп эксплуатируемых блоков. Различные веса w_i определяют, каким группам в зависимости от наработок элементов может быть отдано при этом предпочтение. Очевидно, что при вычислении $V_{ar}[\Lambda]$ следует полагаться на средний результат по наработкам групп.

Один из подходов к вычислению параметров m и V для общей совокупности данных основан на методе максимального правдоподобия (МП) для безусловного распределения количества отказов при некотором двухпараметрическом априорном распределении. При этом указанные параметры становятся зависящими от результатов наблюдений состоятельными и эффективными статистическими оценками.

Естественным является выбор распределения, сопряженного с условным распределением совокупной выборки. Таким распределением в схеме Пуассона будет гамма-распределение с плотностью $\Gamma(\lambda, s, \tau) = \frac{1}{\Gamma(s)} \tau^s \lambda^{s-1} e^{-\lambda\tau}$. При этом: $m = \frac{s}{\tau}$, $V = \frac{s}{\tau^2}$. Один из способов получения оценок дисперсии на основе (10) приводит к следующим простым соотношениям:

$$V_{ar}[\hat{m}] = \frac{s}{\tau} \frac{1}{\sum_{i=1}^K T_i (1 - P_i)} = \frac{s}{\tau^2} \frac{1}{\sum_{i=1}^K P_i} = \frac{V}{\sum_{i=1}^K P_i}; \quad (11)$$

$$V_{ar}[\Lambda] = V + \sum_{i=1}^K w_{i,opt} \frac{m}{T_i} = V + \frac{m}{\tau} \frac{\sum_{i=1}^K (1 - P_i)}{\sum_{i=1}^K P_i} = V \left(1 + \frac{\sum_{i=1}^K (1 - P_i)}{\sum_{i=1}^K P_i} \right) = \frac{VK}{\sum_{i=1}^K P_i}, \quad (12)$$

$$\text{где } P_i = \frac{T_i}{T_i + \tau}, \quad w_{i,opt} = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^K P_i}$$

Приведенные выше формулы получены для любых значений параметров s и τ , которые превращаются в оценки этих параметров путем построения и нахождения максимума функции правдоподобия. Метод дает наиболее согласующиеся с наблюдаемыми статистическими результатами оценки параметров искомого Г-распределения. Безусловное распределение совокупности выборочных данных задается формулой

$$P_i(r_1, \dots, r_K; T_1, \dots, T_K; s, \tau) = \prod_{i=1}^K \int_0^\infty P_i(r_i, T_i | v) \Gamma(v, s, \tau) dv. \quad (13)$$

После интегрирования получаем выражение для функции правдоподобия:

$$L_i(s, \tau) = \frac{\prod_{i=1}^K \Gamma(s + r_i)}{[\Gamma(s)]^K \prod_{i=1}^K \Gamma(r_i + 1)} \prod_{i=1}^K \left(\frac{T_i}{T_i + \tau} \right)^{r_i} \left(\frac{\tau}{T_i + \tau} \right)^s. \quad (14)$$

Для поиска максимума вначале удобно рассмотреть уравнение (14) как функцию переменной τ при фиксированном s . Для этого достаточно ограничиться произведением в правой части (14). Переходя к логарифму, получим следующее выражение для поиска максимума:

$$\sum_{i=1}^K r_i \ln \left(\frac{T_i}{T_i + \tau} \right) + s \sum_{i=1}^K \ln \left(\frac{\tau}{T_i + \tau} \right) \quad (15)$$

Можно показать, что в точке максимума должно быть выполнено

$$s = \tau \sum_{i=1}^K w_{opti} \frac{r_i}{T_i}. \quad (16)$$

Подставляя значение s из (16) в (15), получаем функцию одного переменного τ , численное нахождение максимума которой дает искомые оценки обоих параметров. Можно показать, что при любом конечном s максимум (15) существует и достигается в единственной точке.

Заметим, что из результатов описанной выше процедуры следует также, что определяемая по максимуму (15) оценка $\hat{m}$ является эффективной в классе линейных оценок. Действительно, в точке экстремума выполняется (16), что указывает, что полученная оценка МП принадлежит классу линейных оценок (5), а из (7) вытекает, что для любых коэффициентов $w_i \neq w_{i_{opt}}$ в классе таких оценок дисперсия $\hat{m}$ будет заведомо больше.

Результаты применения данного подхода для конкретных примеров показывают, что при явно выраженной неоднородности объединяемых данных функция будет иметь конечный максимум по τ на положительной полуоси. В этом случае, как следует из уравнения (9), оценка дисперсии $\hat{V}_{ar}[\Lambda]$ всегда будет превышать дисперсию V так же, как и оценку дисперсии $V_{ar}[\hat{m}]$.

При однородных данных функция (11) постоянно возрастает и имеет максимум на бесконечности. В этом случае s , сохраняя отношение (13) неизменным, также следует полагать бесконечным. Это означает, что Γ -распределение концентрируется в одной точке, значения P_i приближаются к нулю, (11) и (12) принимают вид, характерный для простого суммирования числа событий и наработок:

$$V_{ar}[\hat{m}] \rightarrow \frac{m}{\left(\sum_{i=1}^k T_i\right)}; V_{ar}[\Lambda] \rightarrow \frac{m}{\left(\sum_{i=1}^k T_i\right) / K}.$$

При этом (12) остается конечной при увеличении числа групп, если только сохраняется конечной средняя наработка по группам.

Результаты

В качестве примера рассмотрим задачу оценки интенсивности отказов группы однотипного оборудования для разработки ВАБ проектируемой АЭС. Для оценки выбрано семь блоков-аналогов, отличающихся датой ввода в эксплуатацию и наработкой. Для каждого блока известно число произошедших отказов оборудования в аналогичных группах за период его эксплуатации, и выполнена оценка частной интенсивности отказов. Указанная информация представлена в табл. 1

Таблица 1

	Блок 1	Блок 2	Блок 3	Блок 4	Блок 5	Блок 6	Блок 7	Всего
Период эксплуатации, T , год	2,0	4,0	6,0	8,0	4,0	10,0	16,0	50,0
Число событий, r	5	1	0	4	2	6	2	20
Оценки $\hat{\lambda}_i$ с априорным неинформативным распределением	2,75	0,38	0,08	0,56	0,63	0,65	0,16	0,40

Если использовать простое суммирование информации (полагая ее однородной), получим с применением неинформативного распределения Джеффриса для общего распределения такую оценку интенсивности отказов:

$$\hat{\lambda} = \frac{r_{sum} + 0,5}{T_{sum}} = 0,41 \text{ 1/год.}$$

Из анализа таблицы видно, что частные оценки интенсивности отказов по пяти из семи блоков выходит за границы 90 %-го толерантного интервала, что свидетельствует о существенном занижении параметров неопределенности полученной оценки и невозможности ее использования. Причина такого расхождения заключена в игнорировании неоднородности учитываемой информации. Исследования на максимум (14) приводят к результатам, представленным на рис. 1. В данном примере функция правдоподобия имеет максимум в точке $\tau = 2,66$. Значение средней оценки $\hat{\lambda}$ составляет 0,53 1/год, коэффициента ошибки – 4,52. Нижняя 5 % и верхняя 95 % границы толерантного интервала равны 0,023 1/год и 1,61 1/год соответственно.

Видно, что одна из семи частных оценок интенсивности отказов (для блока 1) также выпадает за границы интервала вправо. Это может говорить о наличии физической причины, не позволяющей учитывать данную группу в составе общего набора данных. В данном примере большое число событий за первые два года эксплуатации блока 1 может быть связано с начальным периодом приработки.

В таких случаях рекомендуется подтвердить наличие фактической причины расхождения и выполнить переоценку общей интенсивности отказов без учета группы с резко выпадающим значением.

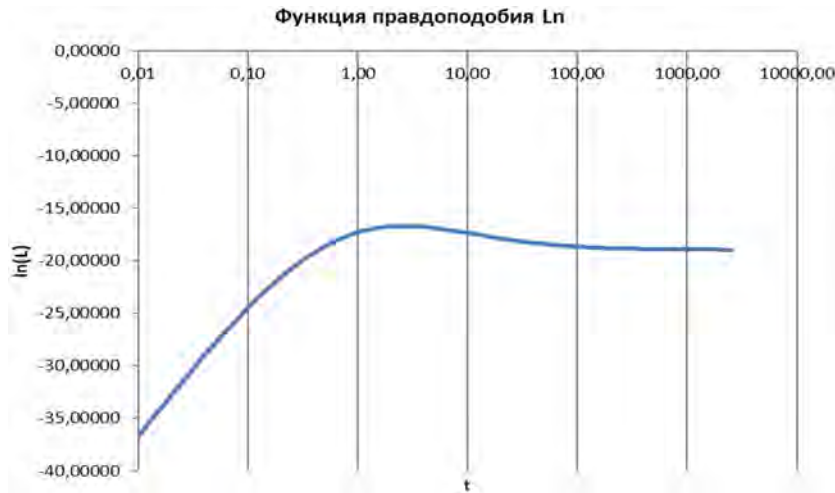


Рис. 1. Результаты исследований на максимум

Исключение группы 1 приводит к снижению средней оценки до 0,32 1/год, при этом коэффициент ошибки составит 3,14, что близко к типовым значениям, часто используемым в ВАБ. Частные оценки для шести групп не выходят за границы 90 % интервала (0,043, 0,82). Таким образом, полученная оценка обладает большим статистическим качеством и может использоваться при разработке ВАБ проектируемого блока. При этом следует отметить также, что полученные во втором примере результаты оценки интенсивности отказов имеют слабую чувствительность к пропуску одного события в любой из учитываемых групп данных.

Результаты максимизации функции правдоподобия без учета группы 1 представлены на рис. 2.

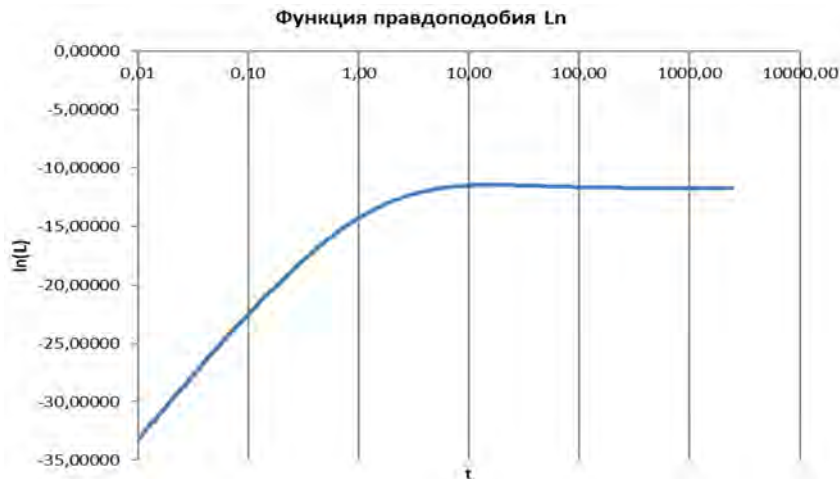


Рис. 2. Результаты максимизации функции правдоподобия без учета группы 1

Необходимо отметить, что выпадение частных оценок за границы толерантного интервала само по себе (в отсутствие какой-либо реальной причины) не должно являться основанием для исключения данных, так как часто может быть объяснено статистически (например, выпадение при большом числе групп, обусловленное естественным разбросом). Если анализ указывает на отсутствие реальной причины такого выпадения, исключение групп не выполняется.

Заключение

Представлено описание подхода к получению оценок интенсивностей отказов оборудования АЭС на основании привлечения дополнительной информации по блокам-аналогам в случаях, когда

специфическая информация, отвечающая объекту анализа отсутствует (случай проектируемого блока). Сформулированы критерии, которым должны удовлетворять методы оценивания и привлекаемая информационная база, разработан математический аппарат получения оценок параметров на основе применения метода максимального правдоподобия.

Для иллюстрации предложенного метода рассмотрены примеры, показывающие, что его применение позволяет получить разумные с точки зрения практики и корректные с точки зрения математической статистики оценки интенсивности отказов, обладающие приемлемым уровнем качества.

Список литературы

1. Основные рекомендации по разработке вероятностного анализа безопасности уровня 1 блока атомной станции для внутренних исходных событий : руководство по безопасности при использовании атомной энергии. РБ-024-19 Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. М., 2019. 67 с.
2. Глущенко А., Морозов В., Токмачев Г. Методология и программное обеспечение, используемое для разработки базы данных для ВАБ, и их практическое применение для действующих АЭС с реакторами типа ВВЭР : докл. на ежегодной конференции молодых специалистов (ОКБ «Гидропресс», Подольск, Московская обл., 19 – 20 января 2006 г.). Подольск, 2006.
3. Морозов В. Б. Совершенствование моделей и методов вероятностного анализа безопасности АЭС и их применение в практике проектирования и эксплуатации АЭС с реакторами ВВЭР : дис. ... д-ра техн. наук. М., 2020. 283 с.
4. Siu N. O., Kelly D. L. Bayesian Parameter Estimation in Probabilistic Risk Assessment // Reliability Engineering and System Safety. 1998. Vol. 62, iss. 1-2. P. 89–116.
5. Боровков А. А. Математическая статистика. СПб. : Лань, 2010. 705 с.
6. Morozov V. A Treatment of Uncertainties for Component Reliability or Initiator Frequency Estimates Based on Combining Data Sources with the Potential of Non-Homogeneity // Proceedings of the International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment PSA-99. Washington, DC, 1999. P. 377–379.
7. Jeffreys H. An Invariant Form for the Prior Probability in Estimation Problems // Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1946. Vol. 186. P. 453–461. JSTOR 97883. doi: 10.1098/rspa.1946.0056
8. Handbook of Parameter Estimation in Probabilistic Risk Assessment NUREG/CR-6823, SAND2003-3348P U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory search Washington, DC 20555-000, 2003.

References

1. *Osnovnye rekomendatsii po razrabotke veroyatnostnogo analiza bezopasnosti urovnya 1 bloka atomnoy stantsii dlya vnutrennikh iskhodnykh sobytiy: rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoy energii. RB-024-19 Federal'naya sluzhba po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru = Basic recommendations for the development of a probabilistic safety analysis of level 1 of the nuclear power plant unit for internal initial events : safety guidelines for the use of atomic energy. RB-024-19 Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision. Moscow, 2019:67. (In Russ.)*
2. *Glushchenko A., Morozov V., Tokmachev G. Metodologiya i programmnoe obespechenie, ispol'zuemoe dlya razrabotki bazy dannykh dlya VAB, i ikh prakticheskoe primenenie dlya deystvuyushchikh AES s reaktorami tipa VVER: dokl. na ezhegodnoy konferentsii molodykh spetsialistov (OKB «Gidropress», Podol'sk, Moskovskaya obl., 19–20 yanvarya 2006 g.) = Methodology and software used to develop a database for VAB, and their practical application for operating nuclear power plants with VVER type reactors: a report at the annual conference of young specialists (OKB Gidropress, Podolsk, Moscow region, January 19–20, 2006). Podol'sk, 2006. (In Russ.)*
3. *Morozov V.B. Improvement of models and methods of probabilistic analysis of NPP safety and their application in the practice of designing and operating nuclear power plants with VVER reactors. DSc dissertation. Moscow, 2020:283. (In Russ.)*
4. *Siu N.O., Kelly D.L. Bayesian Parameter Estimation in Probabilistic Risk Assessment. Reliability Engineering and System Safety. 1998;62(1-2):89–116.*
5. *Borovkov A.A. Matematicheskaya statistika = Mathematical statistics. Saint Petersburg: Lan', 2010:705. (In Russ.)*
6. *Morozov V. A Treatment of Uncertainties for Component Reliability or Initiator Frequency Estimates Based on Combining Data Sources with the Potential of Non-Homogeneity. Proceedings of the International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment PSA-99. Washington, DC, 1999:377–379.*
7. *Jeffreys H. An Invariant Form for the Prior Probability in Estimation Problems. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences. 1946;186:453–461. JSTOR 97883. doi: 10.1098/rspa.1946.0056*
8. *Handbook of Parameter Estimation in Probabilistic Risk Assessment NUREG/CR-6823, SAND2003-3348P U.S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory search Washington, DC 20555-000, 2003.*

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Борисович Морозов

доктор технических наук,
директор по вероятностному
анализу безопасности и готовности,
АО «Атомэнергoproject»
(Россия, г. Москва, ул. Бакунинская, 7)
E-mail: Morozov_vb@aep.ru

Vladimir B. Morozov

Doctor of technical sciences,
chief officer on probabilistic safety analysis
and availability analysis,
JSK Atomenergoproekt
(7 Bakuninskaya street, Moscow, Russia)

Марина Алексеевна Морозова

старший преподаватель кафедры РК-1,
Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1)
E-mail: mar@bmstu.ru

Marina A. Morozova

Senior lecturer of the sub-department RK-1,
Bauman Moscow State Technical University
(building 1, 5 2nd Baumanskaya street, Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 10.02.2024

Поступила после рецензирования/Revised 25.02.2024

Принята к публикации/Accepted 05.03.2024

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 519.622.2

doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-6

ПОСТРОЕНИЕ НА ОСНОВЕ ИНТЕРПОЛЯЦИИ МОДЕЛЕЙ РАЗЛИЧНЫХ ФИЗИЧЕСКИХ И ХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ПРОТОТИПИРОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

И. Е. Старостин

Московский государственный технический университет гражданской авиации, Москва, Россия
starostinigo@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Решение практических задач (проектирования и эксплуатации систем) подразумевает построение математических моделей систем. Для математического моделирования систем различной физической и химической природы авторами был предложен метод математического прототипирования энергетических процессов, основывающийся на современной неравновесной термодинамике, механике и электродинамике. Упомянутый метод дает адекватные модели систем, т.е. не противоречащие общим физическим законам, а также особенностям протекания процессов в конкретной системе. Однако для определения контролируемых параметров системы по ее измеряемым параметрам из системы дифференциальных уравнений, полученных методом математического прототипирования, необходимо решать очень трудоемкую задачу идентификации большого числа параметров этих уравнений. Одним из путей борьбы с трудоемкостью упомянутых задач идентификации является использование интерполяционных методов, что обуславливает актуальность задачи разработки методики построения моделей систем методом математического прототипирования энергетических процессов с использованием интерполяционных методов. *Материалы и методы.* Для синтеза уравнений динамики физических и химических процессов используется метод математического прототипирования энергетических процессов. С целью упрощения идентификации параметров уравнений, получаемых методом математического прототипирования, используются специальные методы интегрирования систем дифференциальных уравнений, сводящих интегрирование дифференциальных уравнений к решению алгебраических уравнений. С целью упрощения решения полученных алгебраических уравнений используются методы интерполяции. Для определения постоянных коэффициентов полученной модели из экспериментальных данных используются методы теории идентификации. *Результаты.* Построенная предложенными в настоящей статье методами модель системы является корректной, т.е. не противоречит общезначимым законам и вбирает в себя особенности протекания процессов в конкретной системе. Также обучение модели поблочное и может быть сведено к линейной идентификации, что дает возможность обрабатывать экспериментальные данные по мере их поступления. *Выводы.* Предложенная архитектура преобразованных моделей систем позволяет использовать полученные

модели в составе математического ядра цифровых двойников. Особенности архитектуры предложенных моделей дают возможность их пассивной идентификации.

Ключевые слова: метод математического прототипирования энергетических процессов, цифровые двойники, интерполяция, линейная идентификация, машинное обучение

Для цитирования: Старостин И. Е. Построение на основе интерполяции моделей различных физических и химических систем методом математического прототипирования энергетических процессов // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 49–58. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-6

BUILDING, BASED ON INTERPOLATION, MODELS OF VARIOUS PHYSICAL AND CHEMICAL SYSTEMS BY METHOD OF MATHEMATICAL PROTOTYPING OF ENERGY PROCESSES

I.E. Starostin

Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia
starostinigo@yandex.ru

Abstract. Background. Solving practical problems (design and operation of systems) implies the construction of mathematical models of systems. For mathematical modeling of systems of various physical and chemical natures, the authors proposed a method of mathematical prototyping of energy processes, based on modern nonequilibrium thermodynamics, mechanics and electrodynamics. The mentioned method provides adequate models of systems, i.e. that do not contradict general physical laws, as well as the peculiarities of processes in a particular system. However, to determine the controlled parameters of a system from its measured parameters from a system of differential equations obtained by the method of mathematical prototyping, it is necessary to solve the very labor-intensive task of identifying a large number of parameters of these equations. One of the ways to combat the complexity of the mentioned identification problems is the use of interpolation methods, which determines the relevance of the task of developing a methodology for constructing system models by mathematical prototyping of energy processes using interpolation methods. *Materials and methods.* To synthesize equations for the dynamics of physical and chemical processes, the method of mathematical prototyping of energy processes is used. In order to simplify the identification of the parameters of equations obtained by the method of mathematical prototyping, special methods for integrating systems of differential equations are used, reducing the integration of differential equations to solving algebraic equations. In order to simplify the solution of the resulting algebraic equations, interpolation methods are used. To determine the constant coefficients of the resulting model from experimental data, methods of identification theory are used. *Results.* The system model constructed by the methods proposed in this article is correct, i.e. does not contradict general physical laws and incorporates the peculiarities of the processes in a particular system. Also, model training is block-by-block and can be reduced to linear identification, which makes it possible to process experimental data as it arrives. *Conclusions.* The proposed architecture of transformed system models makes it possible to use the resulting models as part of the mathematical core of digital twins. The architectural features of the proposed models make it possible to passively identify them.

Keywords: method of mathematical prototyping of energy processes, digital twins, interpolation, linear identification, machine learning

For citation: Starostin I.E. Building, based on interpolation, models of various physical and chemical systems by method of mathematical prototyping of energy processes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):49–58. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-6

Введение

Для построения математических моделей (ММ), предназначенных для решения практических задач (ПЗ) проектирования и эксплуатации различных систем [1–4], авторами был предложен в рамках современной неравновесной термодинамики, механики и электродинамики метод математического прототипирования энергетических процессов (ММПЭП) [5]. Построенные ММПЭП модели динамики процессов различной физической и химической природы не противоречат общим законам физики (законам сохранения, началам термодинамики, и т.д.), а также физическим особенностям конкретной системы [5, 6].

Для определения в соответствии с дифференциальными уравнениями (ДУ) динамики системы, полученных ММПЭП, контролируемых параметров (КП) системы по ее измеряемым параметрам

(ИП) необходимо идентифицировать большое число постоянных параметров, входящих в эти ДУ [5, 6], что представляет собой трудоемкую задачу [5–7]. Одним из путей борьбы с такой трудоемкостью является использование специальных методов интегрирования систем ДУ [8], позволяющих свести задачу к решению алгебраических уравнений [8] наряду с локальным упрощением ДУ [6, 8, 9]. Для снижения трудоемкости (в общем случае большой [8]) решения алгебраических уравнений могут быть применены методы интерполяции [8].

Настоящая работа посвящена построению ММ систем, применимых для решения упомянутых ПЗ [1–4], на базе методов ММПЭП [5, 6, 10] и методов интерполяции [8] и идентификации [7].

Материалы и методы

В соответствие с ММПЭП состояние системы характеризуется независимо от ее предыстории параметрами состояния (ПС), изменяющимися в результате протекания физических и химических процессов в ней [5, 6]. Причиной протекания процессов в системе являются динамические силы, определяемые через частные производные свободной энергии по ПС, расходуемой на протекание процессов в системе [5, 6]. Динамические силы и кинетические свойства однозначно определяют протекание процессов в системе [5, 6]. Динамика ПС в системе в свою очередь определяет динамику ИП и КП (рис. 1) [5, 6]. Приведенные на рис. 1 факторы определяют общую структуру ДУ динамики процессов, а также динамики ИП и КП, получаемых ММПЭП [5, 6].

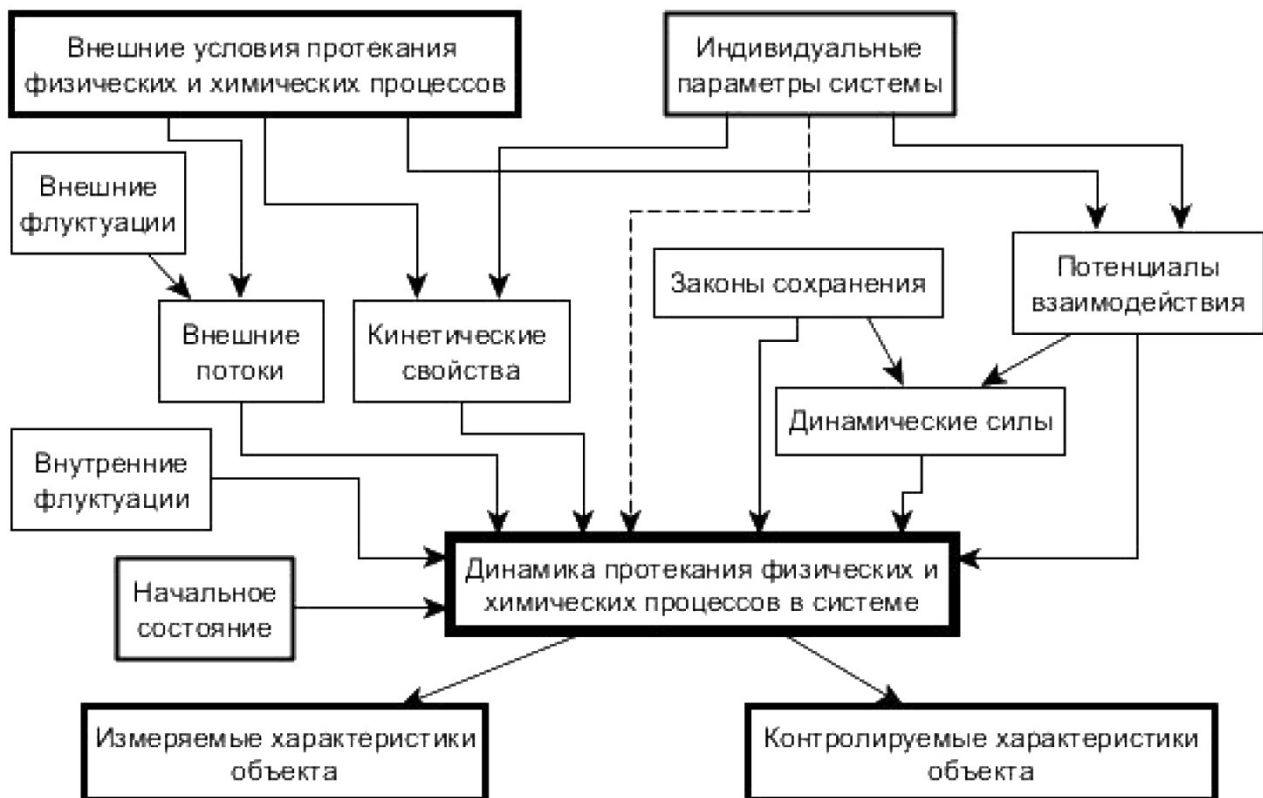


Рис. 1. Факторы, определяющие динамику физических и химических процессов

В общем случае модель объекта (рис. 2) представляет собой алгоритм определения из ИП измеряемых характеристик объекта начального состояния и индивидуальных параметров системы с последующим определением КП системы (с учетом внешних условий протекания процессов) (видно из рис. 1) [5, 7]. Следует отметить, что в КП системы могут войти и ее ИП в последующие моменты времени, а также ее ИП, измерение которых в процессе эксплуатации осуществить невозможно. Для получения модели системы, пригодной для решения ПЗ (рис. 2), необходимо получить из уравнений ММПЭП аналитическое выражение динамики состояния системы, а также функции для определения ее начального состояния и ее индивидуальных параметров [10].

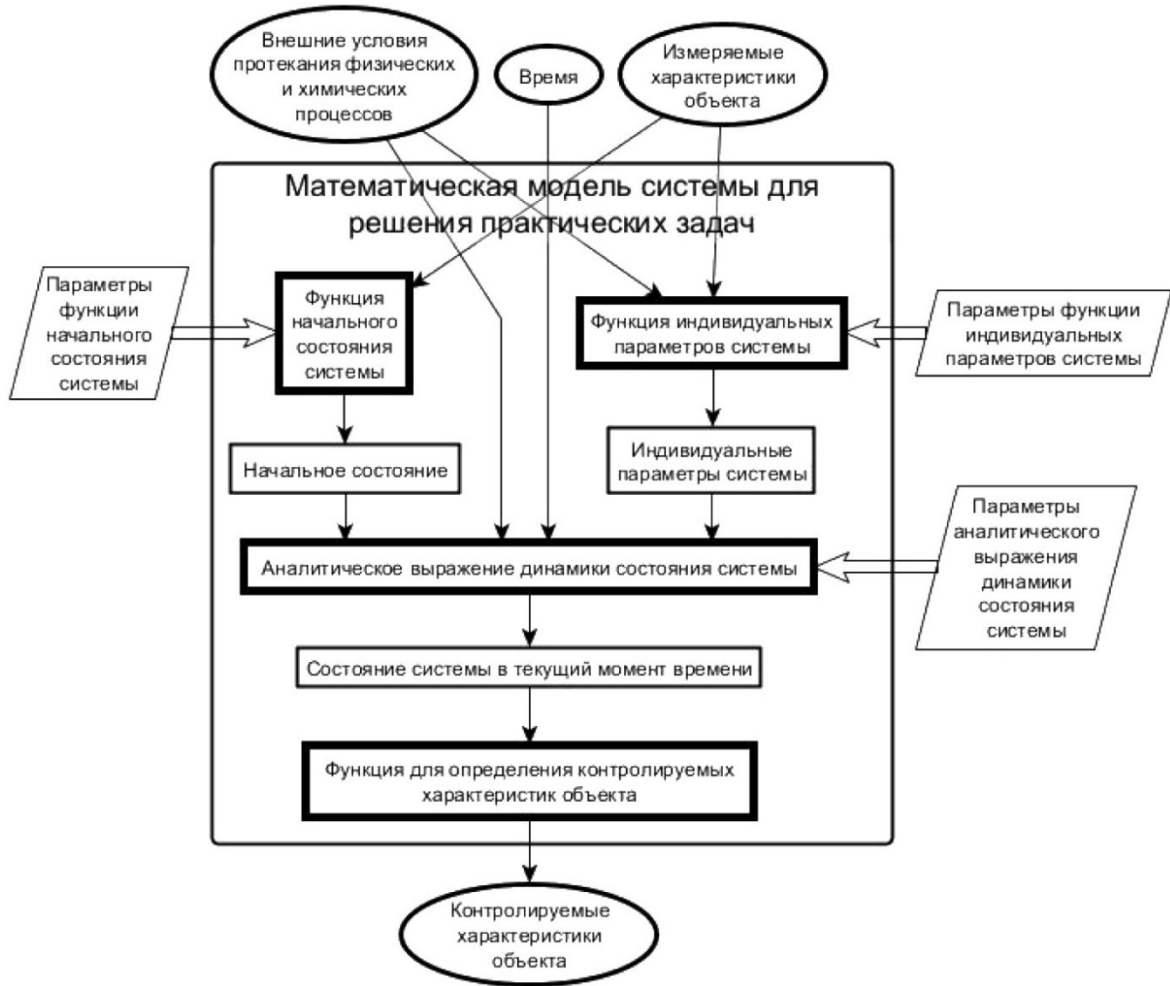


Рис. 2. Математическая модель системы для решения практических задач.
В параллелограммах приведены обучаемые параметры модели

Аналитическое выражение общего решения системы уравнений ММПЭП задается в виде [6]

$$\Delta \mathbf{x}(t) = \Delta \tilde{\mathbf{x}}^* \left(\epsilon(\epsilon_0, t), \hat{\mathbf{u}}(t, \hat{\mathbf{u}}), \mathbf{q}_{\text{дисс}}, \tilde{\mathbf{s}}(t) \right), \quad \hat{\mathbf{u}} = \hat{\mathbf{u}}[U(t)], \quad (1)$$

$$\mathbf{x}(t) = \tilde{\mathbf{x}} \left(\Delta \mathbf{x}(t), \hat{\mathbf{u}}(t, \hat{\mathbf{u}}), \mathbf{q}_{\text{топ}}, \hat{\mathbf{s}}^* \left(\epsilon(\epsilon_0, t), \hat{\mathbf{u}}(t, \hat{\mathbf{u}}), \tilde{\mathbf{s}}(t), \mathbf{q}_{\text{упр}} \right) \right), \quad (2)$$

$$\tilde{\mathbf{s}}(t) = \hat{\mathbf{s}} \left(\epsilon(\epsilon_0, t), \hat{\mathbf{u}}(t, \hat{\mathbf{u}}), \mathbf{q}_{\text{упр}} \right), \quad \epsilon_0 = \tilde{\mathbf{x}}^{*-1} \left(\mathbf{x}_0, \hat{\mathbf{u}}(0, \hat{\mathbf{u}}), \mathbf{q}_{\text{топ}}, \mathbf{q}_{\text{дисс}}, \mathbf{q}_{\text{упр}} \right), \quad (3)$$

где [6, 9]:

$$\epsilon(\epsilon_0, 0) = \epsilon_0, \quad \epsilon(\epsilon_0, t + \tau) = \epsilon(\epsilon_0, \tau, t), \quad \dim(\epsilon) = \dim(\mathbf{x}), \quad (4)$$

$$\forall \epsilon_0, U, \mathbf{q}_{\text{дисс}}, \mathbf{s} \exists \lim_{t \rightarrow +\infty} \left(\Delta \tilde{\mathbf{x}}^* \left(\epsilon(\epsilon_0, t), U, \mathbf{q}_{\text{дисс}}, \mathbf{s} \right) \right) = \Delta \tilde{\mathbf{x}}^{**} \left(\epsilon_0, U, \mathbf{q}_{\text{дисс}}, \mathbf{s} \right), \quad (5)$$

$$\text{из} \left(\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} \right)_{\text{ext}} \equiv 0 \text{ следует } \hat{\mathbf{s}}^* \left(\epsilon, U, \mathbf{s}, \mathbf{q}_{\text{упр}} \right) \equiv \hat{\mathbf{s}}^{**} \left(U, \mathbf{s}, \mathbf{q}_{\text{упр}} \right), \quad (6)$$

$$\text{из } U(t) \equiv U = \text{const} \text{ следует } \hat{\mathbf{u}}(t, \hat{\mathbf{u}}) \equiv \hat{\mathbf{u}}(U), \quad (7)$$

где $\mathbf{x}(t)$ – динамика ПС системы; $\Delta \mathbf{x}(t)$ – динамика величин, характеризующих независимые ПС (не связанные законами сохранения с параметрами баланса [6]); $U(t)$ – динамика характеристик системы,

не изменяющихся в результате протекания процессов внутри нее, а изменяющихся только в результате внешних воздействий на систему; $(dx(t)/dt)_{ext}$ – внешние потоки. Как видно из (1)–(7), функции $\tilde{\mathbf{x}}^*(\Delta\mathbf{x}, U, \mathbf{q}_{top}, \hat{\mathbf{s}}^*)$ и $\Delta\tilde{\mathbf{x}}^*(\epsilon, U, \mathbf{q}_{diss}, \mathbf{s})$ характеризуют топологическую и диссипативную составляющие системы соответственно [6], а функции $\hat{\mathbf{s}}^*(\epsilon, U, \mathbf{s}, \mathbf{q}_{упр})$ и $\hat{\mathbf{s}}(\epsilon, U, \mathbf{q}_{упр})$ – ее управляющую составляющую [6]. Для любого задания динамики ПС в виде (1)–(7) найдется система уравнений ММПЭП, общим решением которого будет эта динамика [6]. Отсюда (1)–(7) является способом задания динамики системы, альтернативным уравнениям ММПЭП. Квадратные скобки в уравнении (1) означают взятие функционала от $\mathbf{U}(t)$.

Измеряемые $\mathbf{y}(t)$ и контролируемые $\mathbf{z}(t)$ параметры системы [6]:

$$\mathbf{y}(t) = \mathbf{Y}[t, \mathbf{x}(t), \mathbf{U}(t)], \quad \mathbf{z}(t) = \mathbf{Z}[t, \mathbf{x}(t), \mathbf{U}(t)]. \quad (8)$$

Для преобразования системы уравнений ММПЭП к виду, пригодному для решения ПЗ, используется локальное упрощение этих ДУ с последующим заданием соответствующих упрощенных аналитических выражений динамик $\mathbf{x}(t)$ в виде (1)–(7), из которых формируется полное решение [5, 6, 9, 11, 12].

Локальные упрощения системы уравнений ММПЭП осуществляются путем локальных упрощений функций состояния (ФС) для свойств веществ и процессов (СВП) с сохранением соответствующих ограничений на упрощенные ФС [5, 6]. Благодаря этому упрощенные уравнения ММПЭП также не противоречат законам физики [5, 6]. Запишем уравнения ММПЭП в виде [11]

$$\frac{d\mathbf{x}(t)}{dt} = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), U(t), \mathbf{p}, \mathbf{a}, \mathbf{w}(\mathbf{x}(t), U(t), \mathbf{p}, \mathbf{a})), \quad (9)$$

где $\mathbf{p}$ – индивидуальные параметры системы; $\mathbf{a}$ – параметры ФС (задаваемых в виде функциональных разложений) для СВП [6, 10, 11]. При этом зависимость правой части (9) к $\mathbf{w}$ меньше, чем к $\mathbf{x}$, U , $\mathbf{p}$, $\mathbf{a}$ [9, 11]. Это дает возможность представить (9) в итерационном виде [11]:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{x}_{k+1,r}(t)}{dt} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}_{k+1,r}(t), U(t), \mathbf{p}, \mathbf{a}, \mathbf{w}_{k,r}(t)), \quad \mathbf{w}_{k,r}(t) = \mathbf{w}(\mathbf{x}_{k,r}(t), U(t), \mathbf{p}, \mathbf{a}), \\ \mathbf{x}_{k,r} &\in \mathbf{X}_r \end{aligned} \quad (10)$$

или в эквивалентном виде [11]:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1,r}(t) &= \mathbf{x}^*(\mathbf{x}_{0,r}, t, \hat{\mathbf{u}}_r, \mathbf{q}, \hat{\mathbf{w}}_{k,r}), \quad \hat{\mathbf{w}}_{k,r} = \hat{\mathbf{w}}_r[\mathbf{w}_{k,r}(t)], \quad \hat{\mathbf{u}}_r = \hat{\mathbf{u}}_r[\mathbf{U}(t)], \\ \mathbf{w}_{k,r}(t) &= \mathbf{w}(\mathbf{x}_{k,r}(t), U(t), \mathbf{q}), \quad t \in [t_r, t_{r+1}], \quad \mathbf{x}_{0,r} = \mathbf{x}(t_r), \end{aligned} \quad (11)$$

где $\mathbf{X}_r$ – области локального упрощения (9). Правая часть (11) получается из (10) [11, 12]. Упрощения (10) могут быть такими, что система (9) при фиксированных $\mathbf{w}_{k,r}$ может распасться на независимые друг от друга подсистемы уравнений [11, 12]. При выборе достаточно малых областей $\mathbf{X}_r$ итерации (10) равномерно приближаются к искомой динамике $\mathbf{x}(t)$ [11] (один из специальных методов интегрирования систем ДУ [8]). Критерием остановки итераций (11) является заданная близость $\mathbf{x}_{k,r}(t)$ к $\mathbf{x}(t)$ из класса динамик (1)–(7), включающих в себя всю физику рассматриваемой системы [6, 10]. Это обеспечивает корректность модели системы, показанной на рис. 2 [10].

Синтез итераций построения преобразованной модели системы

Итерации (11) могут быть получены из уравнения (10) либо аналитически (в случае достаточно простой системы (10) [8]), либо с использованием специальных методов интегрирования систем ДУ [8].

В соответствии со специальными методами интегрирования систем ДУ динамика ПС $\mathbf{x}(t)$ рассматриваемой системы задается через опорные динамики $\mathbf{x}_{k,r,i}(\epsilon(\epsilon_0, t), \hat{\mathbf{u}}_r(t, \hat{\mathbf{u}}_{r,i}))$, $i = \overline{1, n_{on}}$ ПС $\mathbf{x}(t)$, полученные из уравнения (10) для соответствующих значений $\{(\hat{\mathbf{u}}_{r,i}, \mathbf{p}_i, \mathbf{a}_i, \hat{\mathbf{w}}_{k,r,i})\}_{i=1}^{n_{on}}$ в виде (1)–(7), в соответствии с работой [8]:

$$\mathbf{x}_{k,r}(\mathbf{x}_{0,r}, t) = \mathbf{F}_{\mathbf{x},k,r} \left(\left\{ \left(\mathbf{x}_{k,r,i}(\hat{\epsilon}_{k,r,i}(t), \hat{\mathbf{u}}_{r,i}(t)), \mathbf{c}_{k,r,i} \right) \right\}_{i=1}^{n_{on}}, \hat{\mathbf{u}}_r, \mathbf{p}, \hat{\mathbf{w}}_{k,r}, \mathbf{b}_{k,r} \right), \quad (12)$$

$$\hat{\epsilon}_{k,r,i}(t) = \hat{\epsilon}_{k,r,i}^*(\epsilon(\epsilon_0, t), \mathbf{c}_{k,r,i}, \hat{\mathbf{u}}_r, \mathbf{p}, \hat{\mathbf{w}}_{k,r}, \mathbf{b}_{k,r}), \quad i = \overline{1, n_{on}}, \quad (13)$$

$$\hat{\mathbf{u}}_{r,i}(t) = \hat{\mathbf{u}}_{r,i}^*(\hat{\mathbf{u}}_r(t, \hat{\mathbf{u}}_{r,i}), \mathbf{c}_{k,r,i}, \hat{\mathbf{u}}_r, \mathbf{p}, \hat{\mathbf{w}}_{k,r}, \mathbf{b}_{k,r}), \quad i = \overline{1, n_{on}}, \quad (14)$$

$$\epsilon_0 = \mathbf{F}_{\mathbf{x},k,r}^{-1} \left(\mathbf{x}_0, \{ \mathbf{c}_{k,r,i} \}_{i=1}^{n_{on}}, \hat{\mathbf{u}}_r, \mathbf{p}, \hat{\mathbf{w}}_{k,r}, \mathbf{b}_{k,r} \right), \quad (15)$$

где постоянные коэффициенты $\mathbf{c}_{k,r,i} = (\hat{\mathbf{u}}_{r,i}, \mathbf{p}_i, \mathbf{a}_i, \hat{\mathbf{w}}_{k,r,i})$, $i = \overline{1, n_{on}}$, $\mathbf{b}_{k,r} = \mathbf{b}_{k,r}(\mathbf{a})$; функция $\mathbf{F}_{\mathbf{x},k,r} \left(\left\{ (\mathbf{x}_{k,r,i}, \mathbf{c}_{k,r,i}) \right\}_{i=1}^{n_{on}}, \hat{\mathbf{u}}_r, \mathbf{p}, \hat{\mathbf{w}}_{k,r}, \mathbf{b}_{k,r} \right)$ – непрерывна и ограничена; функции $\hat{\epsilon}_{k,r,i}^*(\epsilon, \mathbf{c}_{k,r,i}, \hat{\mathbf{u}}_r, \mathbf{p}, \hat{\mathbf{w}}_{k,r}, \mathbf{b}_{k,r})$, $i = \overline{1, n_{on}}$ таковы, что функции

$$\left\{ \mathbf{x}_{k,r,i} \left(\hat{\epsilon}_{k,r,i}^*(\epsilon(\epsilon_0, t), \hat{\mathbf{c}}_{k,r,i}), \hat{\mathbf{u}}_{r,i}^*(\hat{\mathbf{u}}_r(t, \hat{\mathbf{u}}_{r,i}), \hat{\mathbf{c}}_{k,r,i}) \right) \right\}_{i=1}^{n_{on}},$$

$$\hat{\mathbf{c}}_{k,r,i} = (\mathbf{c}_{k,r,i}, \hat{\mathbf{u}}_r, \mathbf{p}, \hat{\mathbf{w}}_{k,r}, \mathbf{b}_{k,r}), \quad i = \overline{1, n_{on}}$$

с учетом (13) представимы в виде (1)–(6), а функции $\hat{\mathbf{u}}_r(t, \hat{\mathbf{u}}_r)$ удовлетворяют выражению (7). В таком случае нетрудно видеть, что итерации (11), полученные в силу (12)–(15), также удовлетворяют (1)–(7). Опорными динамиками $\mathbf{x}_{k,r,i}(\epsilon(\epsilon_0, t), \hat{\mathbf{u}}_r(t, \hat{\mathbf{u}}_{r,i}))$, $i = \overline{1, n_{on}}$ могут быть общие аналитические решения еще более локально упрощенной системы ДУ (10), качественное поведение которых такое же, как и качественное поведение общего решения системы ДУ (10). Отсюда упомянутые итерации (11)–(15) равномерно сходятся к общему решению некоторой системы ДУ, полученной ММПЭП, при любой непрерывной ограниченной функции $\mathbf{F}_{\mathbf{x},k,r} \left(\left\{ (\mathbf{x}_{k,r,i}, \mathbf{c}_{k,r,i}) \right\}_{i=1}^{n_{on}}, \hat{\mathbf{u}}_r, \mathbf{p}, \hat{\mathbf{w}}_{k,r}, \mathbf{b}_{k,r} \right)$, а значит, являются корректными [6].

Это дает возможность выбора структуры упомянутой интерполяционной функции (с точностью до исследуемых экспериментально входящих в уравнения (12)–(15) коэффициентов $\mathbf{b}_{k,r} = \mathbf{b}_{k,r}(\mathbf{a})$) [8].

Правые части (12)–(15) получаются из моделирования динамик на основе уравнений ММПЭП при различных значениях параметров $\hat{\mathbf{u}}_r$, $\mathbf{p}$, $\hat{\mathbf{w}}_{k,r}$ [10, 13]. Правые части (13) и (14) при этом определяются таким образом, чтобы особые точки опорных динамик совпадали с особыми точками динамики $\mathbf{x}_{k,r}(\mathbf{x}_{0,r}, t)$, соответствующей $\hat{\mathbf{u}}_r$, $\mathbf{p}$, $\hat{\mathbf{w}}_{k,r}$ (так как особые точки упомянутых динамик обуславливаются диссипативной и управляющей составляющими (видно из работы [6])). Это дает возможность задавать правые части (13) и (14) также в виде интерполяционных функций [8]. Что в свою очередь дает возможность одновременного синтеза правых частей (12)–(14) на динамиках, полученных ММПЭП, причем определяемые параметры входят в уравнения (12)–(14) линейно [8], что существенно упрощает синтез правых частей уравнений (12)–(14) [7].

Структура и опорные динамики правых частей уравнений (12)–(14) выбираются на основе качественного анализа динамик ПС $\mathbf{x}(t)$ системы, получаемых из уравнений ММПЭП. В качестве интерполяционных функций, через которые задаются правые части уравнений (12)–(14), может быть взята интерполяция сплайнами [8], интерполяционный полином Лагранжа [8], нейронные сети как универсальный интерполятор [14, 15], а также используя вейвлеты [16].

Идентификация преобразованной модели

В общем случае динамики ИП $\mathbf{y}(t)$ (8) являются динамиками медленно меняющихся составляющих динамик $\tilde{\mathbf{y}}(t)$ некоторых характеристик рассматриваемой системы [17]:

$$\tilde{\mathbf{y}}(t) = \tilde{\mathbf{Y}}(\mathbf{x}(t), \mathbf{U}(t)), \mathbf{y}(t) = \mathbf{Y}[t, \tilde{\mathbf{y}}(t)], \quad (16)$$

причем динамика $\tilde{\mathbf{y}}(t)$ полностью восстанавливается по динамике $\mathbf{y}(t)$ [17]:

$$\tilde{\mathbf{y}}(t) = \hat{\mathbf{Y}}[t, \mathbf{y}(t)]. \quad (17)$$

Приведенный подход обусловливается ограниченной пропускной способностью измерительных датчиков [17]. Из уравнения (16) видно, что, выбрав $\tilde{\mathbf{y}}$ в качестве части параметров состояния $\mathbf{x}$, мы, доведя итерации (11)–(15) до полной модели

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{F}_x \left(\left\{ \left(\mathbf{x}_i(\hat{\epsilon}_i(t), \hat{\mathbf{u}}_i(t)), \mathbf{c}_i \right) \right\}_{i=1}^{n_{on}}, \hat{\mathbf{b}} \right), \epsilon_0 = \mathbf{F}_x^{-1}(\mathbf{x}_0, \{\mathbf{c}_i\}_{i=1}^{n_{on}}, \hat{\mathbf{b}}), \quad (18)$$

$$\hat{\epsilon}_i(t) = \hat{\epsilon}_i^*(\epsilon_0, t, \mathbf{c}_i, \hat{\mathbf{b}}), \hat{\mathbf{u}}_i(t) = \hat{\mathbf{u}}_i^*(\hat{\mathbf{u}}(t, \hat{\mathbf{u}}_i), \mathbf{c}_i, \hat{\mathbf{b}}), i = \overline{1, n_{on}}, \quad (19)$$

$$\hat{\mathbf{b}} = \hat{\mathbf{b}}(\mathbf{b}, \hat{\mathbf{u}}, \mathbf{p}), \mathbf{b} = \mathbf{b}(\mathbf{a}), \quad (20)$$

представимой в виде (1)–(7), можем вышеописанным путем обучение модели (18)–(20) свести к обучению (по данным $\tilde{\mathbf{y}}(t)$) правых частей (18), (19).

Далее на основе полученных коэффициентов $\hat{\mathbf{b}}$ мы определяем, используя (20), значения параметров $\mathbf{b}$, $\hat{\mathbf{u}}$, $\mathbf{p}$, на основе которых в силу (1)–(8) определяются КП $\mathbf{z}(t)$. Пусть имеется для некоторой совокупности экземпляров рассматриваемой системы некоторого бренда множество данных ИП $\left\{ \left(\hat{\mathbf{u}}_{i,j}, \tilde{\mathbf{y}}_{i,j}(t) \right) \right\}_{j=1}^{N_i} \}_{i=1}^{n_{экз}}$, для каждой совокупности $\tilde{\mathbf{y}}_{i,j}(t)$, $j = \overline{1, N_i}$, $i = \overline{1, n_{экз}}$ из них описанным выше путем определим соответствующие $\hat{\mathbf{b}}_{i,j}$, $\epsilon_{0,i,j}$, $j = \overline{1, N_i}$, $i = \overline{1, n_{экз}}$. Здесь $n_{экз}$ – число экземпляров системы рассматриваемого бренда, а N_i , $i = \overline{1, n_{экз}}$ – число испытаний для каждого экземпляра. Затем значения параметров $\mathbf{b}$, $\mathbf{p}_i$, $i = \overline{1, n_{экз}}$ с использованием (20) определим из работы [10]:

$$\hat{\mathbf{b}}_{i,j} = \hat{\mathbf{b}}(\mathbf{b}, \hat{\mathbf{u}}_{i,j}, \mathbf{p}_i), j = \overline{1, N_i}, i = \overline{1, n_{экз}}, \quad (21)$$

получив при этом из уравнения (21) функционалы для $\mathbf{b}$, $\mathbf{p}_i$, $i = \overline{1, n_{экз}}$ [10]:

$$\mathbf{b} = \mathbf{b} \left(\left\{ \left(\hat{\mathbf{u}}_{i,j}, \hat{\mathbf{b}}_{i,j} \right) \right\}_{j=1}^{N_i} \right)_{i=1}^{n_{экз}}, \hat{\mathbf{b}}_{i,j} = \hat{\mathbf{b}}[\tilde{\mathbf{y}}_{i,j}(t)], j = \overline{1, N_i}, i = \overline{1, n_{экз}}, \quad (22)$$

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{p} \left(\mathbf{b}, \left\{ \hat{\mathbf{u}}_{i,j}, \hat{\mathbf{b}}_{i,j} \right\}_{j=1}^{N_i} \right), \hat{\mathbf{b}}_{i,j} = \hat{\mathbf{b}}[\tilde{\mathbf{y}}_{i,j}(t)], j = \overline{1, N_i}, i = \overline{1, n_{экз}}, \quad (23)$$

где функционал $\hat{\mathbf{b}}$ представляет собой вышеописанный алгоритм определения параметров $\hat{\mathbf{b}}$, входящих в уравнения (18) и (19), из динамики $\tilde{\mathbf{y}}(t)$. Функции (22) и (23) могут быть получены путем аналитического либо численно-аналитического (с использованием методов [8, 14–16, 18]) преобразования (21) в уравнения (22) и (23) [10]. Соответственно, правые части уравнений (12)–(14) желательно так выбирать, чтобы уравнения (22) и (23) были получены аналитически из формулы (21).

На основе выражения (23) получим функцию для индивидуальных параметров системы, определяемых через контрольные динамики ИП системы $\tilde{\mathbf{y}}_i^{(контр)}(t)$, $i = \overline{1, N_{контр}}$ при соответствующих контрольных воздействиях $\hat{\mathbf{u}}_i^{(контр)}$, $i = \overline{1, N_{контр}}$ на нее, входящую в архитектуру модели (см. рис. 2) [10]:

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}\left(\mathbf{b}, \left\{\hat{\mathbf{u}}_i^{(\text{контр})}, \hat{\mathbf{b}}_i^{(\text{контр})}\right\}_{i=1}^{N_{\text{контр}}}\right), \hat{\mathbf{b}}_i^{(\text{контр})} = \hat{\mathbf{b}}\left[\tilde{\mathbf{y}}_i^{(\text{контр})}(t)\right], i = \overline{1, N_{\text{контр}}}. \quad (24)$$

Аналогично (24) вводится функционал $\hat{\mathbf{b}}_{\epsilon_0}$ для определения ϵ_0 через текущую динамику ИП $\tilde{\mathbf{y}}(t)$:

$$\epsilon_0 = \hat{\mathbf{b}}_{\epsilon_0}[\tilde{\mathbf{y}}(t)], \quad (25)$$

представляющий собой функцию для начального состояния системы, входящую в архитектуру модели (см. рис. 2) [10].

В частном случае в силу системы (18)–(20) динамика ПС $\mathbf{x}(t)$ может быть выражена через контрольные динамики с точностью до параметров $\mathbf{b}$. Это облегчает определение параметров $\mathbf{b}$ из статистики ИП, что, например, и было сделано в работе [19].

Результаты

Выражения (17)–(20), (24), (25) представляют собой ММ системы (см. рис. 2) [10], пригодную для решения ПЗ [1–4, 10]. Выражения (17) и (22) представляют собой алгоритм обучения упомянутой ММ системы [10].

ММ системы (17)–(20), (24), (25), структура которой показана на рис. 2, строится в соответствии со следующим алгоритмом:

- 1) синтезируем систему ДУ динамики физических и химических процессов в рассматриваемой системе на базе ММПЭП;
- 2) на основе особенностей датчиков ИП рассматриваемой системы формируем соотношение (17);
- 3) выполняем локальные упрощения ФС для СВП рассматриваемой системы, получив тем самым упрощенные ДУ динамики системы;
- 4) для локально упрощенной системы ДУ динамики системы рассчитываем различные динамики ее ПС, ИП и КП при различных случайно сгенерированных значениях экспериментально исследуемых параметров ДУ;
- 5) на основе полученных динамик ПС, ИП и КП рассматриваемой системы формируем итерации (11)–(15) с использованием методов интерполяции;
- 6) на основе сформированных итераций (11)–(15) получаем выражения (18)–(20);
- 7) методами теории идентификации, исходя из преобразованной ММ (18)–(20) и из особенностей испытаний рассматриваемой системы, формируем выражения (22), (24), (25);
- 8) на основе (22) обучаем полученную ММ (17)–(20), (24), (25);
- 9) тестируем полученную ММ (17)–(20), (24), (25) и при необходимости возвращаемся к предыдущим пунктам предложенного алгоритма с целью корректировки синтезированной ММ (17)–(20), (24), (25).

Приведенный алгоритм позволяет обучать ММ как на всех данных сразу, так и обрабатывая обучающие данные по частям.

Обсуждение

Предложенная в настоящей работе методика синтеза ММ (17)–(20), (24), (25) является развитием методов, изложенных в работах [7–10, 13, 14, 16, 20]. Основным отличием предложенного метода от методов, изложенных в работах [14, 16], является использование базисов, вбирающих в себя физику конкретной рассматриваемой системы, что гарантирует корректность построенной модели [5, 10, 20]. Использование локального упрощения уравнений ММПЭП с последующим синтезом сложных динамик ПС из простых динамик ПС, полученных из упрощенных уравнений ММПЭП, в предложенном методе позволяет существенно сократить по сравнению с методами [13] объем вычислений [20].

Заключение

Методика построения ММ (17)–(20), (24), (25) произвольной системы дает ММ системы, которые могут обучаться в том числе на лету (в процессе функционирования объекта). Благодаря этому ММ (17)–(20), (24), (25) целесообразно использовать в составе цифровых двойников.

Список литературы

1. Юревич Е. И. Основы проектирования техники. СПб. : Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, 2012. 135 с.
2. Барзилович Е. Ю. Модели технического обслуживания сложных систем. М. : Высш. шк., 1982. 231 с.
3. Колодежный Л. П., Чернодаров А. В. Надежность и техническая диагностика. М. : Изд-во ВВА им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, 2010. 452 с.
4. Бессекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического управления. СПб. : Профессия, 2003. 768 с.
5. Khalyutin S. P., Starostin I. E., Agafonkina I. V. Generalized Method of Mathematical Prototyping of Energy Processes for Digital Twins Development // *Energies*. 2023. Vol. 16. P. 1933–1958. doi: 10.3390/en16041933
6. Старостин И. Е., Дружинин А. А. Аналитическое приближение решений уравнений метода математического прототипирования энергетических процессов путем качественного анализа этих уравнений // *Надежность и качество сложных систем*. 2023. № 2 (42). С. 22–31. doi: 10.21685/2307-4205-2023-2-3
7. Eykhoff P. *Systems identification: parameters and state estimation*. Eindhoven, Netherlands : University of technology, 1975. 680 p.
8. Калиткин Н. Н. Численные методы. СПб. : БХВ-Петербург, 2011. 592 с.
9. Ланцов В. Н. Методы понижения порядка моделей сложных систем. Владимир : Изд-во ВлГУ, 2017. 84 с.
10. Старостин И. Е., Дружинин А. А., Гавриленков С. И. Использование машинного обучения с учителем для построения математических моделей систем методом математического прототипирования энергетических процессов // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. 2023. Т. 1. С. 66–72.
11. Старостин И. Е. Программная реализация решения потенциально-потокным методом задач построения моделей систем из результатов испытаний этих систем // *Надежность и качество сложных систем*. 2020. № 3 (33). С. 128–136. doi: 10.21685/2307-4205-2020-3-15
12. Starostin I. E., Khalyutin S. P., Bykov V. I. Simplification of potential-flow equations of physical and chemical processes in dynamics for obtaining a mathematical model of a system // *The Complex Systems*. 2019. № 1. P. 74–87.
13. Starostin I. E., Khalyutin S. P. Identification of system models from potential-stream equations on the basis of deep learning on experimental data // *Civil Aviation High Technologies*. 2020. Vol. 23, № 2. P. 47–58.
14. Круглов В. В., Дли М. И., Голунов Р. Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. М. : Физматлит, 2001. 221 с.
15. Галкин В. А., Гавриленко Т. В., Смородинов А. Д. Некоторые аспекты аппроксимации и интерполяции функций искусственными нейронными сетями // *Вестник КРАУНЦ. Физ.-мат. науки*. 2022. Т. 38, № 1. С. 54–73. doi: 10.26117/2079-6641-2022-38-1-54-73
16. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике. М. : СОЛОН-Пресс, 2010. 440 с.
17. Шишкин И. Ф. Теоретическая метрология. Ч. 2. Обеспечение единства измерений. СПб. : Питер, 2012. 240 с.
18. Flach P. *Machine Learning. The Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data*. Cambridge : Cambridge University Press, 2015. 400 p.
19. Starostin I. E., Khalyutin S. P., Davidov A. O. [et al.]. Obtaining a model for the voltage and temperature of the US18650VTC6 Series lithium-ion battery in constant current discharge mode from the analysis of physical and chemical processes in the accumulator // 18th Technical Scientific Conference on aviation dedicated to the memory of N.E. Zhukovsky, TSCZH 2021. 2021. P. 109–117.
20. Малинецкий Г. Г. Математические основы синергетики: Хаос, структуры, вычислительный эксперимент. М. : Ленанд, 2017. 312 с.

References

1. Yurevich E.I. *Osnovy proektirovaniya tekhniki = Fundamentals of engineering design*. Saint Petersburg: Sankt-Peterburgskiy gosudarstvennyy politekhnicheskiiy universitet, 2012:135. (In Russ.)
2. Barzilovich E.Yu. *Modeli tekhnicheskogo obsluzhivaniya slozhnykh system = Models of maintenance of complex systems*. Moscow: Vyssh. shk., 1982:231. (In Russ.)
3. Kolodezhnyy L.P., Chernodarov A.V. *Nadezhnost' i tekhnicheskaya diagnostika = Reliability and technical diagnostics*. Moscow: Izd-vo VVA im. prof. N.E. Zhukovskogo i Yu.A. Gagarina, 2010:452. (In Russ.)
4. Bessekerskiy V.A., Popov E.P. *Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya = Theory of automatic control systems*. Saint Petersburg: Professiya, 2003:768. (In Russ.)
5. Khalyutin S.P., Starostin I.E., Agafonkina I.V. Generalized Method of Mathematical Prototyping of Energy Processes for Digital Twins Development. *Energies*. 2023;16:1933–1958. doi: 10.3390/en16041933
6. Starostin I.E., Druzhinin A.A. Analytical approximation of solutions of equations of the method of mathematical prototyping of energy processes by qualitative analysis of these equations. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(2):22–31. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-2-3
7. Eykhoff P. *Systems identification: parameters and state estimation*. Eindhoven, Netherlands: University of technology, 1975:680.
8. Kalitkin N.N. *Chislennyye metody = Numerical methods*. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2011:592. (In Russ.)

9. Lantsov V.N. *Metody ponizheniya poryadka modeley slozhnykh system = Methods of lowering the order of models of complex systems*. Vladimir: Izd-vo VIGU, 2017:84. (In Russ.)
10. Starostin I.E., Druzhinin A.A., Gavrilentov S.I. Using machine learning with a teacher to build mathematical models of systems by mathematical prototyping of energy processes. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2023;1:66–72. (In Russ.)
11. Starostin I.E. Software implementation of the solution of problems of building models of systems from the test results of these systems by a potentially streaming method. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(3):128–136. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2020-3-15
12. Starostin I.E., Khalyutin S.P., Bykov V.I. Simplification of potential-flow equations of physical and chemical processes in dynamics for obtaining a mathematical model of a system. *The Complex Systems*. 2019;(1):74–87.
13. Starostin I.E., Khalyutin S.P. Identification of system models from potential-stream equations on the basis of deep learning on experimental data. *Civil Aviation High Technologies*. 2020;23(2):47–58.
14. Kruglov V.V., Dli M.I., Golunov R.Yu. *Nechetkaya logika i iskusstvennye neyronnye seti = Fuzzy logic and artificial neural networks*. Moscow: Fizmatlit, 2001:221. (In Russ.)
15. Galkin V.A., Gavrilentov T.V., Smorodinov A.D. Some aspects of approximation and interpolation of functions by artificial neural networks. *Vestnik KRAUNTS. Fiz.-mat. nauki = Vestnik KRAUNTS. Phys.-mat. nauki*. 2022; 38(1):54–73. (In Russ.). doi: 10.26117/2079-6641-2022-38-1-54-73
16. D'yakonov V.P. *Veyvlety. Ot teorii k praktike = Wavelets. From theory to practice*. Moscow: SOLON-Press, 2010:440. (In Russ.)
17. Shishkin I.F. *Teoreticheskaya metrologiya. Ch. 2. Obespechenie edinstva izmereniy = Theoretical metrology. Part. 2. Ensuring the uniformity of measurements*. Saint Petersburg: Piter, 2012:240. (In Russ.)
18. Flach P. *Machine Learning. The Art and Science of Algorithms that Make Sense of Data*. Cambridge: Cambridge University Press, 2015:400.
19. Starostin I.E., Khalyutin S.P., Davidov A.O. et al. Obtaining a model for the voltage and temperature of the US18650VTC6 Series lithium-ion battery in constant current discharge mode from the analysis of physical and chemical processes in the accumulator. *18th Technical Scientific Conference on aviation dedicated to the memory of N.E. Zhukovsky, TSCZH 2021*. 2021:109–117.
20. Malinetskiy G.G. *Matematicheskie osnovy sinergetiki: Khaos, struktury, vychislitel'nyy eksperiment = Mathematical foundations of synergetics: Chaos, structures, computational experiment*. Moscow: Lenand, 2017:312. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Игорь Евгеньевич Старостин

кандидат технических наук,
доцент кафедры электротехники
и авиационного электрооборудования,
Московский государственный технический
университет гражданской авиации
(Россия, г. Москва, Кронштадтский бульвар, 20)
E-mail: starostinigo@yandex.ru

Igor E. Starostin

Candidate of technical sciences, associate professor
of the sub-department of electrical engineering
and aviation electrical equipment,
Moscow State Technical University of Civil Aviation
(20 Kronshtadtskiy boulevard, Moscow, Russia)

**Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /
The author declares no conflicts of interests.**

Поступила в редакцию / Received 12.02.2024

Поступила после рецензирования / Revised 22.02.2024

Принята к публикации / Accepted 29.02.2024

ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДА ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ЭВМ

А. А. Павлов¹, А. Н. Царьков², Ю. А. Романенко³, И. И. Корнеев⁴,
А. Ю. Романенко⁵, М. И. Макеев⁶, Ф. А. Павлов⁷

^{1, 3, 4, 6, 7} Филиал Военной академии Ракетных войск стратегического назначения
имени Петра Великого, Серпухов, Россия

^{2, 5} Институт инженерной физики, Серпухов, Россия

^{1, 7} Pavlov_iif@mail.ru, ² info@iifrf.ru, ³ Romanenko-55@inbox.ru,

⁴ Igor-rus 83@mail.ru, ⁵ romanen79@mail.ru, ⁶ maxmakeev37@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Разработка методического аппарата построения средств обеспечения требуемого уровня вероятности безотказной работы и живучести самовосстанавливаемых специализированных ЭВМ (СЭВМ). При проведении исследований осуществлен анализ условий эксплуатации и выбор показателей надежности для СЭВМ авиационно-космической техники. Сформулированы требования к методам резервирования СЭВМ. Проведена сравнительная оценка обнаруживающей способности и аппаратных затрат при реализации мажоритарного метода резервирования, метода дублирования и использования корректирующих кодов. *Материалы и методы.* Обоснована целесообразность использования метода дублирования для повышения вероятности безотказной работы и живучести самовосстанавливаемых СЭВМ, с использованием алгебраических линейных кодов, для выявления неисправного резервного канала. В отличие от известных кодов предлагается использовать алгебраический линейный код, у которого значения проверочных разрядов соответствуют прямым и инверсным значениям информационных разрядов, что позволяет обнаруживать ошибки при считывании информации с инверсных выходов ЗУ, корректировать одиночные ошибки, обнаруживать двойные ошибки и контролировать логическую операцию инвертирования, необходимую для представления отрицательного числа в дополнительном коде, что дает возможность адаптировать код для контроля арифметических и логических операций процессора СЭВМ. Проведена оценка вероятности безотказной работы дублированной СЭВМ, при ее общем резервировании, с обнаружением и коррекцией одиночных ошибок в резервных каналах запоминающего устройства и обнаружением ошибок в резервных каналах арифметическо-логического устройства процессора на основе предлагаемого кода и оценка вероятности безотказной работы СЭВМ, при ее раздельном резервировании, с обнаружением ошибок в резервных каналах дублированного ЗУ на основе кода Хемминга и коррекцией ошибок в резервных каналах АЛУ процессора на основе мажоритарного метода. *Результаты и выводы.* В результате сравнения вероятностей безотказной работы установлено, что общее резервирование СЭВМ на основе предлагаемого кода по сравнению с раздельным резервированием ЗУ и АЛУ процессора СЭВМ позволяет обеспечить выигрыш в вероятности безотказной работы СЭВМ и ее функциональных устройств на всем периоде эксплуатации.

Ключевые слова: алгебраический линейный код, дополнительный код, операция инвертирования, мажоритарный метод резервирования, дублирование

Для цитирования: Павлов А. А., Царьков А. Н., Романенко Ю. А., Корнеев И. И., Романенко А. Ю., Макеев М. И., Павлов Ф. А. Формирование метода повышения надежности специализированных ЭВМ // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 59–69. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-7

FORMATION OF A METHOD FOR INCREASING THE RELIABILITY OF SPECIALIZED COMPUTERS

A.A. Pavlov¹, A.N. Tsarkov², Yu.A. Romanenko³, I.I. Korneev⁴,
A.Yu. Romanenko⁵, M.I. Makeev⁶, F.A. Pavlov⁷

^{1, 3, 4, 6, 7} Branch of the Military Academy of Strategic Missile Forces named after Peter the Great, Serpukhov, Russia

^{2, 5} Institute of Engineering Physics, Serpukhov, Russia

^{1, 7} Pavlov_iif@mail.ru, ² info@iifrf.ru, ³ Romanenko-55@inbox.ru,

⁴ Igor-rus 83@mail.ru, ⁵ romanen79@mail.ru, ⁶ maxmakeev37@gmail.com

Abstract. *Background.* Development of a methodological apparatus for constructing means to ensure the required level of probability of failure-free operation and survivability of self-healing specialized computers (SEVMs). During the research, an analysis of operating conditions and a selection of reliability indicators for computers of aerospace equipment was carried out. Requirements for computer backup methods are formulated. A comparative assessment of the detecting ability and hardware costs was carried out when implementing the majority redundancy method, the duplication method and the use of correcting codes. *Materials and methods.* The expediency of using the duplication method is substantiated to increase the probability of failure-free operation and survivability of self-healing central computers, using algebraic linear codes to identify a faulty backup channel. Unlike known codes, it is proposed to use an algebraic linear code, in which the values of the check bits correspond to the direct and inverse values of the information bits, which makes it possible to detect errors when reading information from the inverse outputs of the memory, correct single errors, detect double errors and control the logical inversion operation, necessary to represent a negative number in two's complement code, which makes it possible to adapt the code to control arithmetic and logical operations of the computer processor. An assessment was made of the probability of failure-free operation of a duplicated computer, with its general redundancy, with detection and correction of single errors in the backup memory channels and detection of errors in the backup channels of the processor ALU based on the proposed code, and an assessment of the probability of failure-free operation of the computer, with its separate redundancy, with error detection in the backup channels of the duplicated memory based on the Hamming code and error correction in the backup channels of the processor ALU based on the majority method. *Results and conclusions.* As a result of comparing the probabilities of failure-free operation, it was established that the general redundancy of the computer based on the proposed code, in comparison with the separate redundancy of the memory and ALU of the computer processor, allows for a gain in the probability of failure-free operation of the computer and its functional devices throughout the entire period of operation.

Keywords: algebraic linear code, complementary code, inversion operation, majority reservation method, duplication

For citation: Pavlov A.A., Tsarkov A.N., Romanenko Yu.A., Korneev I.I., Romanenko A.Yu., Makeev M.I., Pavlov F.A. Formation of a method for increasing the reliability of specialized computers. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):59–69. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-7

Введение

Современные системы управления объектами ракетно-космической техники (РКТ) характеризуются широким использованием специализированных ЭВМ (СЭВМ). В соответствии с ГОСТ 27.003-2016 данные объекты имеют один основной вариант применения по назначению и относятся к объектам однократного применения (с предшествующим периодом ожидания применения).

По последствиям отказов они относятся к объектам, отказы которых приводят к катастрофическим последствиям, основным показателем надежности которых является вероятность безотказной работы. Важным свойством СЭВМ является живучесть, характеризующая ее способность противостоять дестабилизирующим факторам и отказам некоторых компонентов (ГОСТ Р 27.102-2021).

В этом случае для парирования возникающих отказов СЭВМ должны иметь возможность самовосстановления, т.е. обеспечить возможность перехода ее в работоспособное состояние без вмешательства извне (ГОСТ Р 27.102-2021).

Целью работы является разработка методического аппарата построения средств обеспечения требуемого уровня вероятности безотказной работы и живучести самовосстанавливаемых СЭВМ.

Выбор метода резервирования СЭВМ

Для рассматриваемых объектов методы резервирования должны отвечать следующим требованиям:

- иметь высокую обнаруживающую способность;
- использовать минимальные аппаратные затраты на обнаружение отказов и восстановление работоспособного состояния;
- не оказывать существенного влияния на быстродействие резервируемой СЭВМ;
- обеспечивать обнаружение отказов и восстановление работоспособности различных функциональных узлов СЭВМ (запоминающих устройств и узлов процессора ЭВМ).

В настоящее время для обеспечения требуемого уровня вероятности безотказности работы СЭВМ широко используются структурные методы резервирования, включающие мажоритарный метод, дублирование, корректирующие коды.

При мажоритарном резервировании коррекция ошибки осуществляется за счет использования результата одинаковой работы большинства основных элементов (ГОСТ Р 27.102-2021).

Достоинство мажоритарного метода резервирования:

- не оказывает существенного влияния на быстродействие резервируемой СЭВМ;
- не требуется переключения на резервный блок, и как следствие, нет потери текущей информации;
- используется для общего резервирования СЭВМ;
- имеет высокую обнаруживающую способность.

Утверждение 1. Число не обнаруживаемых ошибок структурными методами равно: $Q = 2^k - 1$, где k – число информационных разрядов (не обнаруживаются ошибки, возникающие одновременно в одноименных разрядах).

Следствие 1. Обнаруживающая способность мажоритарного метода (два из трех) составит: $P_{об.м} = 1 - [(2^k - 1)/(2^{3k} - 1)]$.

Если каждая СЭВМ содержит 32 информационных разряда, то обнаруживающая способность мажоритарного метода равна

$$P_{об.м} = 1 - \frac{4,295}{7,923 \cdot 10^{19}} \approx 1.$$

Недостатком мажоритарного метода являются большие аппаратные затраты на резервирование.

Дублирование также может использоваться для общего резервирования СЭВМ в нагруженном режиме с замещением.

Основной проблемой дублирования СЭВМ является выбор средств контроля для определения отказавшего канала (обнаружения ошибок в обрабатываемой информации). Для обеспечения максимально возможной обнаруживающей способности средств контроля можно использовать идентичную СЭВМ, но в этом случае аппаратные затраты превысят аппаратные затраты, используемые при мажоритарном методе резервирования.

Эффективным методом обнаружения ошибок в СЭВМ является использование корректирующих кодов. Так, например, алгебраический линейный код с минимальным кодовым расстоянием $d = 3$ позволяет корректировать одиночные ошибки или обнаруживать двойные ошибки при использовании 10–30 % аппаратных затрат относительно резервируемого устройства [9].

К недостаткам использования корректирующих кодов следует отнести:

- как правило, используются для отдельного резервирования (обнаружения и коррекции ошибок, возникающих в запоминающих устройствах, для обнаружения и коррекции ошибок в АЛУ используется мажоритарное резервирование);
- не все коды могут быть адаптированы для обнаружения и коррекции ошибок в устройствах процессора;
- резкое увеличение аппаратных затрат при использовании алгебраических линейных кодов для обнаружения и коррекции кратных ошибок.

Для сокращения аппаратных затрат следует ограничиться использованием кода с $d = 3$. Экспериментально установлено, что для кода Хемминга (17,12), с минимальным кодовым расстоянием $d = 3$, вероятность обнаружения ошибок произвольной кратности составляет

$$P_{об.ХЭ} = 1 - 0,0313 = 0,9687.$$

Процент ошибок, не обнаруживаемых кодом Хемминга с $d = 3$, составляет $Q_x = 3,13$ %. Не обнаруживаются ошибки, которые переводят «запрещенный» (ошибочный) кодовый набор в разрешенный (при котором синдром ошибки равен нулю). В этом случае число запрещенных кодовых наборов составит $Q = 2^k - 1$, тогда расчетная вероятность обнаружения ошибок произвольной кратности кодом Хемминга может быть определена по формуле

$$P_{об.ХР} = 1 - [(2^k - 1)/(2^n - 1)],$$

где $n = k + r$; r – число проверочных разрядов.

Для кода Хемминга (17,12) получим

$$P_{\text{об.ПХР}} = 1 - \frac{4,095 \cdot 10^3}{1,311 \cdot 10^5} = 1 - 0,031 = 0,968,$$

т.е. можно считать, что $P_{\text{об.ХЭ}} \approx P_{\text{об.ПХР}}$.

Таким образом, для сокращения аппаратных затрат при резервировании СЭВМ следует использовать дублирование с замещением, а для обнаружения ошибок в резервных каналах целесообразно использовать алгебраические линейные коды с $d = 3$, позволяющие обнаруживать и корректировать одиночные ошибки в запоминающих устройствах и в устройствах процессора.

Выбор кода для обнаружения ошибок в резервных каналах

Для обнаружения ошибок при выполнении арифметической операции вычитания следует использовать код, позволяющий контролировать логическую операцию отрицания, необходимую для представления отрицательного числа в дополнительном коде. Алгоритм построения кода, контролирующего логическую операцию отрицания, представлен в работе [1] и включают следующие положения.

Для первых трех информационных разрядов формируются проверки

$$r_1 = y_1 \oplus y_2;$$

$$r_2 = y_2 \oplus y_3;$$

$$r_3 = y_1 \oplus y_3,$$

которые могут быть описаны первой проверочной матрицей:

$$H_1 = \begin{vmatrix} y_3 & y_2 & y_1 & r_3 & r_2 & r_1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Например, для двоичного набора 101 получим кодовый набор: 101 110.

Полученный код имеет минимальное кодовое расстояние $d = 3$.

Рассматриваемый код обладает следующим свойством.

Свойство 1. Проверочные разряды для прямого и инверсного значения информационных разрядов имеют одинаковые значения.

Для рассматриваемого примера инверсным значениям информационных разрядов 010 соответствуют значения проверочных разрядов 110, что позволяет обнаруживать ошибки при выполнении операции инвертирования.

При использовании шести информационных разрядов проверочная матрица имеет вид

$$H_2 = \begin{vmatrix} y_6 & y_5 & y_4 & y_3 & y_2 & y_1 & r_4 & r_3 & r_2 & r_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Свойство 2. Если в i -й строке информационной части проверочной матрицы содержится нечетное количество единиц, то для инверсного двоичного набора и значения i -го проверочного разряда выполняется условие: $r_i^{\text{И}} = \bar{r}_i^{\text{П}}$, где $r_i^{\text{П}}$ – значение проверочного разряда для прямого значения информационных разрядов.

Рассматриваемый код может корректировать одиночные ошибки при считывании информации с прямых и инверсных выходов ЗУ при условии обнаружения ошибок большей кратности. С этой целью осуществим модификацию кода (осуществим проверку на четность всего кодового набора).

Свойство 3. При четном числе информационных разрядов значение разряда проверки на четность имеет одинаковое значение для прямых и инверсных значений информационных разрядов, при нечетном числе информационных разрядов – инверсное значение.

При увеличении числа информационных разрядов до 32 получим проверочную матрицу H_3 :

$$H_3 = \begin{matrix} & y_{32} & y_{31} & y_{30} & y_{29} & y_{28} & y_{27} & y_{26} & y_{25} & y_{24} & y_{23} & y_{22} & y_{21} & y_{20} & y_{19} & y_{18} & y_{17} & y_{16} & y_{15} & y_{14} & y_{13} \\ \begin{matrix} y_{32} \\ y_{31} \\ y_{30} \\ y_{29} \\ y_{28} \\ y_{27} \\ y_{26} \\ y_{25} \\ y_{24} \\ y_{23} \\ y_{22} \\ y_{21} \\ y_{20} \\ y_{19} \\ y_{18} \\ y_{17} \\ y_{16} \\ y_{15} \\ y_{14} \\ y_{13} \end{matrix} & \begin{matrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{matrix} \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} y_{12} & y_{11} & y_{10} & y_9 & y_8 & y_7 & y_6 & y_5 & y_4 & y_3 & y_2 & y_1 & r_7 & r_6 & r_5 & r_4 & r_3 & r_2 & r_1 \\ \begin{matrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix} \end{matrix}$$

В результате имеем семь проверок, которые формируются по правилу:

$$r_1 = y_1 \oplus y_2 \oplus y_4 \oplus y_5 \oplus y_7 \oplus y_8 \oplus y_{10} \oplus y_{11} \oplus y_{12} \oplus y_{14} \oplus y_{16} \oplus y_{17} \oplus y_{19} \oplus y_{20} \oplus y_{22} \oplus y_{23} \oplus y_{25} \oplus y_{26} \oplus y_{28} \oplus y_{29} \oplus y_{31} \oplus y_{32};$$

$$r_2 = y_2 \oplus y_3 \oplus y_5 \oplus y_6 \oplus y_8 \oplus y_9 \oplus y_{11} \oplus y_{12} \oplus y_{14} \oplus y_{15} \oplus y_{17} \oplus y_{18} \oplus y_{20} \oplus y_{21} \oplus y_{23} \oplus y_{24} \oplus y_{26} \oplus y_{27} \oplus y_{29} \oplus y_{30} \oplus y_{32};$$

$$r_3 = y_1 \oplus y_3 \oplus y_4 \oplus y_6 \oplus y_7 \oplus y_9 \oplus y_{10} \oplus y_{12} \oplus y_{13} \oplus y_{15} \oplus y_{16} \oplus y_{18} \oplus y_{19} \oplus y_{21} \oplus y_{22} \oplus y_{24} \oplus y_{25} \oplus y_{27} \oplus y_{28} \oplus y_{30} \oplus y_{31};$$

$$r_4 = y_1 \oplus y_7 \oplus y_8 \oplus y_9 \oplus y_{10} \oplus y_{11} \oplus y_{12} \oplus y_{13} \oplus y_{14} \oplus y_{15} \oplus y_{19} \oplus y_{20} \oplus y_{21} \oplus y_{25} \oplus y_{26} \oplus y_{27} \oplus y_{28} \oplus y_{30} \oplus y_{31} \oplus y_{32};$$

$$r_5 = y_1 \oplus y_2 \oplus y_3 \oplus y_4 \oplus y_5 \oplus y_6 \oplus y_{13} \oplus y_{14} \oplus y_{15} \oplus y_{16} \oplus y_{17} \oplus y_{18} \oplus y_{25} \oplus y_{26} \oplus y_{27};$$

$$r_6 = y_{13} \oplus y_{14} \oplus y_{15} \oplus y_{16} \oplus y_{17} \oplus y_{18} \oplus y_{19} \oplus y_{20} \oplus y_{21} \oplus y_{22} \oplus y_{23} \oplus y_{24} \oplus y_{28} \oplus y_{29} \oplus y_{30};$$

$$r_7 = y_{25} \oplus y_{26} \oplus y_{27} \oplus y_{28} \oplus y_{29} \oplus y_{30} \oplus y_{31} \oplus y_{32}.$$

Вероятность обнаружения ошибок кода (39,32) составит $P_{об.и} = 0,992$.

Кроме контроля операции инвертирования, рассматриваемый код может быть адаптирован для выявления ошибок при выполнении процессорных функций по правилам, изложенным в работе [2, 3].

Правило 1. При выполнении арифметической операции сложения осуществляется сложение по mod2 проверочных разрядов слагаемых, и полученный результат складывается по mod2 со значением поправки, формирование которой осуществляется путем кодирования функции переносов выбранным методом кодирования.

Правило 2. При выполнении логической операции суммирования по mod2 результат сложения по mod2 проверочных разрядов слагаемых соответствует результату сложения по mod2 информационных разрядов рассматриваемых слагаемых.

Правило 3. При выполнении логической операции ИЛИ (И) осуществляется операция сложения по mod2 значений проверочных разрядов слагаемых, а к полученному результату прибавляется значение поправки, сформированной на основе кодирования информации, полученной при выполнении логической операции И (ИЛИ) относительно рассматриваемых информационных разрядов.

Таким образом, при дублировании СЭВМ для обнаружения ошибок в резервных каналах целесообразно использовать корректирующий код с обнаружением ошибок при проведении операции инвертирования и адаптированного для обнаружения ошибок при проведении арифметических и логических операций.

Сравнительная оценка предлагаемого метода резервирования с существующими методами

Для повышения вероятности безотказной работы СЭВМ широко используется раздельное резервирование – дублирование ЗУ с обнаружением ошибок в каналах кодом Хемминга и мажоритарное резервирование процессора. Использование предлагаемого кода для обнаружения ошибок в резервных каналах СЭВМ позволяет осуществить общее резервирование. В связи с этим возникает необходимость проведения сравнительной оценки выигрыша в надежности от использования общего и раздельного резервирования СЭВМ.

Допустим, требуется осуществить резервирование 32-разрядной СЭВМ, с объемом памяти один килобайт 32-разрядных слов. Для приблизительной оценки аппаратных затрат на построение ЗУ и АЛУ процессора используем двухвходовые логические элементы, при этом будем считать, что: RS-триггер, включающий логические элементы (л.э.) для синхронизации процесса записи и считывания информации содержит 6 л.э.; простейший сумматор – 9 л.э.; полусумматор – 4 л.э.

В этом случае аппаратные затраты на построение ЗУ составят 192 000 л.э. Допустим, интенсивность отказа одного простейшего логического элемента составляет $\lambda = 10^{-11} \frac{1}{ч}$, тогда вероятность безотказной работы рассматриваемого ЗУ составит

$$P_{ЗУ}(t) = e^{-\sum \lambda(t)t} = e^{-192\,000 \cdot 10^{-11} t}.$$

Арифметико-логическое устройство (АЛУ) процессора содержит: 32-разрядный сумматор – 288 л.э.; 32-разрядный регистр сумматора – 192 л.э.; регистр числа – 192 л.э., регистр дополнительный – 192 л.э., регистр дополнительного кода – 192 л.э.; блок элементов И – 32 л.э., блок элементов ИЛИ – 32 л.э., блок сумматоров по mod – 128 л.э., блок инвертирования – 32 л.э. Аппаратные затраты на построение АЛУ процессора СЭВМ составят 1280 л.э.

Вероятность безотказной работы нерезервированного АЛУ равна

$$P_{АЛУ}(t) = e^{-\sum \lambda(t)t} = e^{-1280 \cdot 10^{-11} t}.$$

Общие аппаратные затраты ЗУ и АЛУ СЭВМ составят 193280 л.э., соответственно, безотказной работы нерезервированной СЭВМ равна $P_{СЭВМ}(t) = e^{-\sum \lambda(t)t} = e^{-193\,280 \cdot 10^{-11} t}$.

Аппаратные затраты на построение средств обнаружения и коррекции одиночных ошибок в ЗУ на основе предлагаемого кода включают: объем памяти для хранения значений семи проверочных разрядов и значения разряда четности – 48 000 л.э.; входное кодирующее устройство ЗУ – 616 л.э. (154 сумматора по mod2); выходное кодирующее устройство ЗУ – 616 л.э.; схему сравнения – 32 л.э.

Для формирования вектора ошибки потребуются дешифратор на семь входов. При построении двухступенчатого дешифратора число двухвходовых схем составит [4]

$$C_{ДЕШ} = 2^{r_1} + 2^{r_2} + 2^r,$$

где $r_1 = \frac{r+1}{2}$, $r_2 = \frac{r-1}{2}$. В нашем случае аппаратные затраты на построение дешифратора составят 152 л.э.

Для исправления одиночных ошибок корректор должен включать 39 элементов неравнозначности или 156 л.э.

В этом случае вероятность безотказной работы ЗУ с коррекцией одиночных ошибок с учетом того, что вероятность возникновения одиночной ошибки в ЗУ составляет 0,8 (соответственно, вероятность возникновения двойной ошибки и ошибок большей кратности равна 0,2) равна [5–8]:

$$P_{\text{ЗУКО}}(t) = \{P_{\text{ЗУ}}(t)P_{\text{К1}}(t) + 0,8[(1 - P_{\text{ЗУ}}(t))P_{\text{К1}}(t)] + 0,8[(1 - P_{\text{К1}}(t))P_{\text{ЗУ}}(t)]\}P_{\text{К2}}(t)P_{\text{СР}}(t)P_{\text{ДШ}}(t)P_{\text{КОР}}(t),$$

$P_{\text{К1}}(t) = e^{-48616 \cdot 10^{-11}t}$ – вероятность безотказной работы входного кодирующего устройства и аппаратуры для хранения проверочных разрядов; $P_{\text{К2}}(t) = e^{-616 \cdot 10^{-11}t}$ – вероятность безотказной работы выходного кодирующего устройства; $P_{\text{СР}}(t) = e^{-32 \cdot 10^{-11}t}$ – вероятность безотказной работы схемы сравнения; $P_{\text{ДШ}}(t) = e^{-152 \cdot 10^{-11}t}$ – вероятность безотказной работы дешифратора; $P_{\text{КОР}}(t) = e^{-156 \cdot 10^{-11}t}$ – вероятность безотказной работы корректора.

Для обнаружения двойных ошибок используем проверку на четность значений разрядов всего кодового набора. В этом случае для формирования проверки на четность потребуется 38 элементов неравнозначности на кодирование информации, 38 элементов неравнозначности на декодирование информации, 1 элемент неравнозначности для сравнения значений проверочных разрядов на четность, 6000 л.э. – для хранения значений проверочных разрядов в ЗУ, итого 6308 л.э. [9, 10].

Для обеспечения живучести ЗУ при возникновении двойных ошибок и ошибок большей кратности используем дублирование с замещением.

Вероятность безотказной работы дублированного ЗУ с обнаружением ошибок в каналах предлагаемым кодом равна [5]

$$PD_{\text{ПК}}(t) = (P_{\text{ЗУКО}}(t)(2 - P_{\text{ЗУКО}}(t))P_{\text{ОБН}}P_{\text{П}}(t)P_{\text{Ч}}(t),$$

где $P_{\text{ОБН}} = 0,992$ – обнаруживающая способность кода для 32 информационных разрядов; $P_{\text{Ч}}(t) = e^{-6308 \cdot 10^{-11}t}$ – вероятность схемы проверки на четность; $P_{\text{П}}(t)$ – вероятность безотказной работы переключающей схемы. Для каждого канала переключающей схемы потребуется 32 логических элемента И (всего 64 л.э.) и 32 логических элемента ИЛИ, итого 96 л.э.

Для обнаружения ошибок в ЗУ при считывании информации одновременно с прямыми и инверсных выходов (64 выхода) кодом Хемминга потребуется 7 проверочных разрядов.

Утверждение 2. При считывании информации одновременно с прямыми и инверсных выходов ЗУ коррекция одиночной ошибки кодом Хемминга невозможна, так как отказ одного элемента памяти приводит к возникновению двойной ошибки (возникновению ошибок на прямом и инверсном выходах элемента памяти).

Вероятность обнаружения ошибок кодом Хемминга (71,64) составит: $P_{\text{об.Х}} = 0,992$.

Аппаратурные затраты на построение средств обнаружения ошибок на основе кода Хемминга включают: объем памяти для хранения значений семи проверочных разрядов – 42 000 л.э.; входное кодирующее устройство ЗУ – 820 л.э. (205 сумматора по mod2); выходное кодирующее устройство ЗУ – 820 л.э.; схему сравнения – 28 л.э., элементы ИЛИ – 6 л.э., схему переключения прямых и инверсных выходов ЗУ – 96 л.э., что составляет 43770 л.э.

Свойство 3. При использовании кода Хемминга для обнаружения ошибок на прямых и инверсных выходах ЗУ потребуется в два раза больше аппаратуры на кодирование и декодирование информации (без учета проверки на четность кодового набора) и равное количество аппаратуры при модификации предлагаемого кода.

Таким образом, суммарные аппаратурные затраты на построение ЗУ, контролируемого кодом Хемминга, составляют 235 770 л.э.:

$$P_{\text{ЗУХ}}(t) = e^{-\sum \lambda(t)t} = e^{-235770 \cdot 10^{-11}t}.$$

Вероятность безотказной работы дублированного ЗУ с обнаружением ошибок в каналах кодом Хемминга равна [5]

$$PD_{\text{Х}}(t) = (P_{\text{ЗУХ}}(t)(2 - P_{\text{ЗУХ}}(t))P_{\text{ОБН}}P_{\text{П}}(t).$$

На рис. 1 представлены графические характеристики вероятностей безотказной работы: нерезервированного ЗУ; дублированного ЗУ, с обнаружением и коррекцией одиночных ошибок в каналах предлагаемым кодом; дублированного ЗУ с обнаружением ошибок в каналах кодом Хемминга.

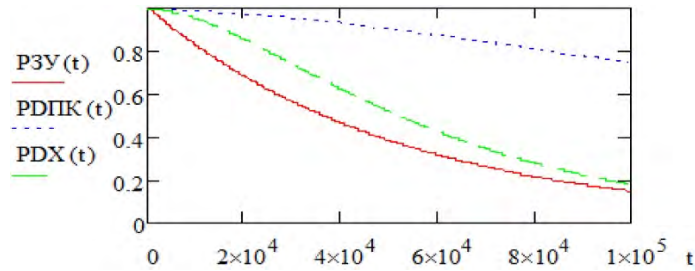


Рис. 1. Графические зависимости вероятностей безотказной работы: $P_{ЗУ}(t)$ – нерезервированного ЗУ; $PD_{ПК}(t)$ – дублированного ЗУ с обнаружением и коррекцией одиночных ошибок в каналах предлагаемым кодом; $PDX(t)$ – дублированного ЗУ с обнаружением ошибок в каналах кодом Хемминга

При общем резервировании СЭВМ на основе дублирования и обнаружения ошибок в АЛУ каждого канала предлагаемым кодом каждый из регистров АЛУ дополняется семью элементами памяти. Аппаратурные затраты для хранения проверочных разрядов в четырех регистрах АЛУ составят 168 л.э. Кроме этого, для обнаружения ошибок непосредственно в АЛУ потребуется кодирующее устройство для формирования поправки к проверочным разрядам – 460 л.э.; схема сложения по mod2 семи проверочных разрядов – 32 л.э., схема переключения содержащая – 96 л.э. Аппаратура контроля АЛУ включает 660 л.э. Суммарные аппаратурные затраты на построение контролируемого АЛУ включают 2036 л.э., т.е. вероятность безотказной работы контролируемого АЛУ составит

$$P_{АЛУК}(t) = e^{-\sum \lambda(t)t} = e^{-2036 \cdot 10^{-11}t}.$$

Вероятность безотказной работы дублированного АЛУ с обнаружением ошибок предлагаемым кодом равна

$$PD_{АЛУ}(t) = (P_{АЛУК}(t)(2 - P_{АЛУК}(t))).$$

Вероятность безотказной работы АЛУ процессора СЭВМ, резервированной мажоритарным методом, равна [6]

$$P_{МАЛУ}(t) = (3P_{АЛУ}(t)^2 - 2P_{АЛУ}(t)^3)P_{РО}(t),$$

где $P_{РО}(t)$ – вероятность безотказной работы решающего органа. Для коррекции ошибки в одном информационном разряде реализуется функция: $y = y^1 y^2 y^3 \bar{y}^1 y^2 y^3 \bar{y}^1 \bar{y}^2 y^3 \bar{y}^1 y^2 \bar{y}^3$, где y^j – значение информационного разряда по одному из трех каналов. Для 32 информационных разрядов потребуется 352 двухвходовых логических элемента.

На рис. 2 представлены графические характеристики вероятностей безотказной работы (при интенсивности отказов л.э. $\lambda = 10^8$ 1/ч): нерезервированного АЛУ; дублированного АЛУ с обнаружением ошибок предлагаемым кодом; АЛУ резервированного мажоритарным методом.

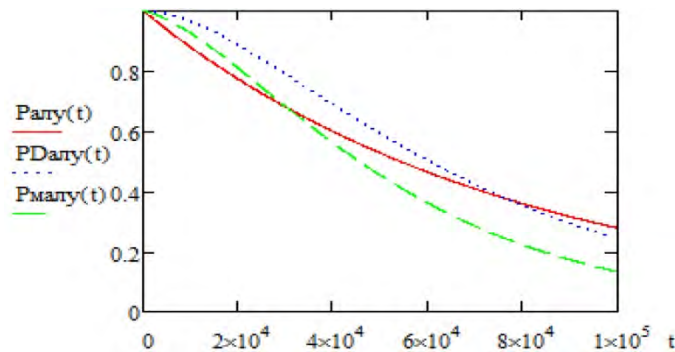


Рис. 2. Графические зависимости вероятностей безотказной работы: $P_{АЛУ}(t)$ – нерезервированного АЛУ; $PD_{АЛУ}(t)$ – дублированного АЛУ с обнаружением ошибок предлагаемым кодом; $P_{МАЛУ}(t)$ – АЛУ резервированного мажоритарным методом

При раздельном резервировании СЭВМ (дублированием ЗУ с обнаружением ошибок в каждом канале кодом Хемминга и мажоритарным резервированием АЛУ процессора) ее вероятность безотказной работы составит: $P_{ЭВМР}(t) = P_{ДХ}(t) P_{МАЛУ}(t)$.

При общем резервировании СЭВМ методом дублирования, с обнаружением ошибок в ЗУ и АЛУ процессора на основе предлагаемого кода, вероятность безотказной работы составит

$$P_{СЭВМО}(t) = [P_{ЗУПМ}(t) P_{АЛУК}(t) (2 - P_{ЗУПМ}(t) P_{АЛУК}(t))] P_{ОБН} P_{П}(t).$$

На рис. 3 представлены графические характеристики вероятностей безотказной работы: нерезервированной СЭВМ, резервированной мажоритарным методом и методом дублирования с замещением.

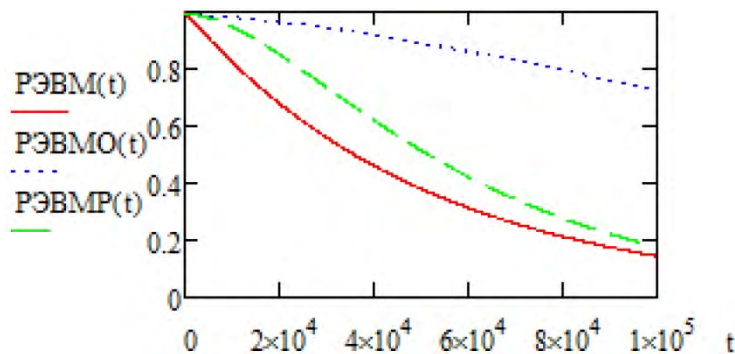


Рис. 3. Вероятности безотказной работы: $P(t)$ – нерезервированной СЭВМ; $PM(t)$ – резервированной СЭВМ мажоритарным методом; $PD(t)$ – резервированной СЭВМ методом дублирования с замещением

Заключение

В результате проведенных исследований установлено, что использование предлагаемого кода при равных аппаратных затратах с кодом Хемминга позволяет обнаруживать и корректировать одиночные ошибки при считывании информации с прямых и инверсных выходов ЗУ и обнаруживать двойные ошибки (код Хемминга позволяет только их обнаруживать).

При организации дублирования предлагаемый код обнаруживает ошибки в АЛУ при выполнении процессорных функций в резервных каналах, что позволяет сократить аппаратные затраты на 33 % по отношению к мажоритарному методу резервирования.

В результате сравнительной оценки вероятностей безотказной работы дублированной СЭВМ, реализующей общее резервирование с замещением и обнаружением ошибок в резервных каналах на основе предлагаемого кода, с вероятностью безотказной работы СЭВМ, реализующей раздельное резервирование на основе кода Хемминга и мажоритарного метода резервирования, установлено, что предлагаемый метод дублирования позволяет обеспечить выигрыш в вероятности безотказной работы СЭВМ на всем периоде ее эксплуатации.

Список литературы

1. Павлов А. А., Царьков А. Н., Романенко Ю. А. [и др.]. Обнаружение и коррекции ошибок в устройствах хранения информации // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2023. № 2. С. 52–57.
2. Павлов А. А., Павлов А. А., Павлов А. П. [и др.]. Контроль процессора в автоматизированных измерительных системах // Измерительная техника. 2011. № 2. С. 12–15.
3. Павлов А. А., Павлов Ал. А., Павлов П. А. [и др.]. Метод контроля АЛУ при выполнении арифметических и логических операций // Контроль. Диагностика. 2011. № 3 (153). С. 48–54.
4. Преснухин Л. Н., Нестеров П. В. Цифровые вычислительные машины. М. : Высш. шк., 1981. 511 с.
5. Щербаков Н. С. Самокорректирующиеся дискретные устройства. М. : Машиностроение, 1975. 214 с.
6. Щербаков Н. С. Достоверность работы цифровых устройств. М. : Машиностроение, 1989. 224 с.
7. Naseer R., Draper J. Parallel Double Error Correcting Code Design to Mitigate Multi-Bit Upsets in SRAMs // Information Sciences Institute University of Southern California, IEEE Trans Device. Mater. 2008. Vol. 6. P. 222–225.
8. Prager K., Vahey M., Farwell W. [et al.]. A fault tolerant signal processing computer // Dependable Systems and Networks 2000 (DSN 2000) : proceedings of International conference. New York, USA, 2000. P. 169–174.

9. Северцев Н. А., Зацаринный А. А. Учет случайности нагрузки и прочности в расчетах надежности конструкций оборонных технических систем для безопасной работы // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 4. С. 90–96.
10. Теличкань В. С., Увайсов С. У., Иванов И. А. Влияние ударных воздействий на показатели качества оптических систем посадки самолетов // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 1. С. 93–100.

References

1. Pavlov A.A., Tsar'kov A.N., Romanenko Yu.A. et al. Detection and correction of errors in information storage devices. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* = *Devices and systems. Management, control, diagnostics*. 2023;(2):52–57. (In Russ.)
2. Pavlov A.A., Pavlov A.A., Pavlov A.P. et al. Processor control in automated measuring systems. *Izmeritel'naya tekhnika* = *Measuring equipment*. 2011;(2):12–15. (In Russ.)
3. Pavlov A.A., Pavlov A.A., Pavlov P.A. et al. The method of ALU control when performing arithmetic and logical operations. *Kontrol'. Diagnostika* = *Control. Diagnostics*. 2011;(3):48–54. (In Russ.)
4. Presnukhin L.N., Nesterov P.V. *Tsifrovye vychislitel'nye mashiny* = *Digital computing machines*. Moscow: Vyssh. shk., 1981:511. (In Russ.)
5. Shcherbakov N.S. *Samokorrekiruyushchiesya diskretnye ustroystva* = *Self-correcting discrete devices*. Moscow: Mashinostroenie, 1975:214. (In Russ.)
6. Shcherbakov N.S. *Dostovernost' raboty tsifrovyykh ustroystv* = *Reliability of digital devices*. Moscow: Mashinostroenie, 1989:224. (In Russ.)
7. Naseer R., Draper J. Parallel Double Error Correcting Code Design to Mitigate Multi-Bit Upsets in SRAMs. *Information Sciences Institute University of Southern California, IEEE Trans Device. Mater.* 2008;6:222–225.
8. Prager K., Vahey M., Farwell W. et al. A fault tolerant signal processing computer. *Dependable Systems and Networks 2000 (DSN 2000): proceedings of International conference*. New York, USA, 2000:169–174.
9. Severtsev N.A., Zatsarinnyy A.A. Taking into account the randomness of load and strength in calculations of reliability of structures of defense technical systems for safe operation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* = *Reliability and quality of complex systems*. 2017;(4):90–96. (In Russ.)
10. Telichkan' V.S., Uvaysov S.U., Ivanov I.A. The impact of shock effects on the quality indicators of optical aircraft landing systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system* = *Reliability and quality of complex systems*. 2018;(1):93–100. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Алексеевич Павлов

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры материаловедения и ремонта вооружения, Филиал Военной академии Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого (Россия, г. Серпухов, ул. Бригадная, 17)
E-mail: Pavlov_iif@mail.ru

Алексей Николаевич Царьков

доктор технических наук, профессор, председатель правления института, Институт инженерной физики (Россия, г. Серпухов, Большой Ударный пер., 1а)
E-mail: info@iifrf.ru

Юрий Александрович Романенко

доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Филиал Военной академии Ракетных войск стратегического назначения имени Петра Великого (Россия, г. Серпухов, ул. Бригадная, 17)
E-mail: Romanenko-55@inbox.ru

Aleksandr A. Pavlov

Doctor of technical sciences, professor, professor of the sub-department of materials science and armament repair, Branch of the Military Academy of the Strategic Missile Forces named after Peter the Great (17 Brigadnaya street, Serpukhov, Russia)

Aleksey N. Tsarkov

Doctor of technical sciences, professor, chairman of the board of the Institute, Institute of Engineering Physics (1a Bolshoi Udarney lane, Serpukhov, Russia)

Yuriy A. Romanenko

Doctor of technical sciences, professor, leading researcher, Branch of the Military Academy of Strategic Missile Forces named after Peter the Great (17 Brigadnaya street, Serpukhov, Russia)

Игорь Игоревич Корнеев

кандидат технических наук, доцент, начальник
кафедры материаловедения и ремонта вооружения,
Филиал Военной академии Ракетных войск
стратегического назначения имени Петра Великого
(Россия, г. Серпухов, ул. Бригадная, 17)
E-mail: Igor-rus 83@mail.ru

Александр Юрьевич Романенко

кандидат технических наук, научный сотрудник,
Институт инженерной физики
(Россия, г. Серпухов, Большой Ударный пер., 1а)
E-mail: romanen79@mail.ru

Максим Игоревич Макеев

адъюнкт,
Филиал Военной академии Ракетных войск
стратегического назначения имени Петра Великого
(Россия, г. Серпухов, ул. Бригадная, 17)
E-mail: maxmakeev37@gmail.com

Федор Алексеевич Павлов

научный сотрудник,
Филиал Военной академии Ракетных войск
стратегического назначения имени Петра Великого
(Россия, г. Серпухов, ул. Бригадная, 17)
E-mail: Pavlov_iif@mail.ru

Igor I. Korneev

Candidate of technical sciences, associate professor,
head of the sub-department of materials
science and armament repair,
Branch of the Military Academy of Strategic
Missile Forces named after Peter the Great
(17 Brigadnaya street, Serpukhov, Russia)

Alexander Yu. Romanenko

Candidate of technical sciences, researcher,
Institute of Engineering Physics
(1a Bolshoi Udarney lane, Serpukhov, Russia)

Maxim I. Makeev

Adjunct,
Branch of the Military Academy of Strategic
Missile Forces named after Peter the Great
(17 Brigadnaya street, Serpukhov, Russia)

Fedor A. Pavlov

Researcher,
Branch of the Military Academy of Strategic
Missile Forces named after Peter the Great
(17 Brigadnaya street, Serpukhov, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 25.01.2024

Поступила после рецензирования/Revised 10.02.2024

Принята к публикации/Accepted 28.02.2024

МЕТОДИКА РЕГУЛИРОВКИ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРОВ

Д. Н. Новомейский¹, М. Н. Пиганов², А. А. Лупцов³, В. П. Перевертов⁴

^{1, 2, 3} Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева, Самара, Россия

⁴ Самарский государственный университет путей сообщения, Самара, Россия

^{1, 2, 3} kipres@ssau.ru, ⁴ vperevertov@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность темы данной работы обусловлена необходимостью снижения уровня проникающей помехи и повышения качества полезного сигнала, принимаемого бортовой станцией активных помех. Цель – улучшение качества и функциональных параметров бортовых частотно-избирательных систем и структур путем регулировки амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) фильтров. *Материалы и методы.* Использованы системный анализ основных параметров, моделирование частотных характеристик ослабления и коэффициента стоячей волны по напряжению, экспертные оценки, исследовательские испытания. Для улучшения характеристик фильтров предложено проводить настройку (регулировку) амплитудно-частотных характеристик фильтров. Приведены схемы и топологии корректоров. Показано, что с помощью тонкопленочных и толстопленочных корректоров можно устранить различные искажения АЧХ, регулировать наклон характеристики, изменять глубину провала АЧХ. *Результаты.* Предложенные схемы, конструкции и топологии корректоров позволяют регулировать наклон характеристик до 16 дБ, изменять глубину их провала, поддерживать коэффициент стоячей волны по напряжению в пределах 1,35...2,5 в рабочем диапазоне частот, уменьшить неравномерность АЧХ до 0,2 дБ, а коэффициент шума – до 2,3...2,4 дБ. Для обеспечения такого уровня показателей в процессе корректировки требуется проводить индивидуальную комбинированную подгонку сопротивлений резисторов в пределах –10...+30 % или функциональную – по шаблону. При этом метод факельного разряда обеспечивает более высокую временную стабильность показателей регулировки АЧХ и больший выход годных изделий по сравнению с лазерным методом. *Выводы.* Предложенная методика регулировки амплитудно-частотных характеристик фильтров частотно-избирательной системы позволяет улучшить качество полезного сигнала, принимаемого станции активных помех. Регулировка АЧХ путем подгонки сопротивлений резисторов корректора методом факельного разряда обеспечивает более высокую временную стабильность параметров, чем при лазерной подгонке.

Ключевые слова: амплитудно-частотная характеристика, регулировка, исследование, моделирование, фильтр

Для цитирования: Новомейский Д. Н., Пиганов М. Н., Лупцов А. А., Перевертов В. П. Методика регулировки амплитудно-частотных характеристик фильтров // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 70–80. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-8

THE METHOD OF ADJUSTING THE AMPLITUDE-FREQUENCY CHARACTERISTICS OF FILTERS

D.N. Novomeisky¹, M.N. Piganov², A.A. Luptsov³, V.P. Perevertov⁴

^{1, 2, 3} Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia

⁴ Samara State University of Communications, Samara, Russia

^{1, 2, 3} kipres@ssau.ru, ⁴ vperevertov@yandex.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the topic of this work is due to the need to reduce the level of penetrating interference and improve the quality of the useful signal received by the on-board active interference station. Goal – improving the quality and functional parameters of on-board frequency-selective systems and structures by adjusting the amplitude-frequency characteristics of filters. *Materials and methods.* The system analysis of the main parameters, modeling of the frequency characteristics of attenuation and the standing wave voltage coefficient, expert assessments, and research tests were used. The system analysis of the main parameters, modeling of the frequency characteristics of attenuation and the standing wave voltage coefficient, expert assessments, and research tests were used. To improve the characteristics of the filters, it is proposed to adjust (adjust) the amplitude-frequency characteristics of the filters.

The schemes and topologies of correctors are given. It is shown that with the help of thin-film and thick-film correctors, various frequency response distortions can be eliminated, the slope of the characteristic can be adjusted, and the depth of the frequency response dip can be changed. *Results.* The proposed schemes, designs and topologies of correctors allow you to adjust the slope of the characteristics up to 16dB, change the depth of their failure, maintain VSWR within 1.35...2.5 in the operating frequency range, reduce the frequency response unevenness to 0.2 dB, and the noise factor to 2.3...2.4 dB. To ensure such a level of performance during the adjustment process, it is required to carry out an individual combined adjustment of the resistors in the range of $-10...+30\%$ or functional – according to a template. At the same time, the flare discharge method provides a higher time stability of the frequency response adjustment indicators and a higher yield of suitable products compared to the laser method. *Conclusions.* The proposed method of adjusting the amplitude-frequency characteristics of the filters of the frequency-selective system makes it possible to improve the quality of the useful signal received by the active interference station. Adjusting the frequency response by adjusting the resistors of the corrector resistors by the flare discharge method provides a higher time stability of the parameters than with laser adjustment.

Keywords: amplitude-frequency response, adjustment, research, modeling, filter

For citation: Novomeisky D.N., Piganov M.N., Luptsov A.A., Perevertov V.P. The method of adjusting the amplitude-frequency characteristics of filters. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2024;(1): 70–80. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-8

Введение

На данном этапе стала более актуальной проблема оптимизации показателей качества и параметров надежности сложных систем. Соответственно, в процессе их проектирования необходимо решить оптимизационную задачу с целью определения наилучших значений показателей и параметров системы или ее структуры [1], а также давать оценку стабильности ее функционирования [2].

К числу таких систем можно отнести частотно-избирательные системы (ЧИС). Они находят широкое применение в бортовой радиоэлектронной аппаратуре, например, в станциях активных помех (САП). Особенностью САП является неполное знание характеристик радиоканала распространения радиоклебания.

Целью статьи является повышение качества бортовых частотно-избирательных систем и структур.

В данной работе проведен анализ основных характеристик частотно-избирательных систем САП, выполнено моделирование частотных характеристик ослабления и коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН), разработаны рекомендации по настройке фильтров.

Анализ параметров бортовых САП

Одним из основных показателей качества САП является уровень проникающей помехи. Для подавления этих помех используются различные методы [3, 4].

Их можно считать неслучайными параметрами, значения которых априорно неизвестны. В этих условиях проникающую на вход приемника САП помеху, обусловленную распространением излучаемого радиосигнала от передающей к приемной антенне САП, можно представить в виде

$$\dot{U}_{\text{прон}}(t) = \sum_{k=1}^M \dot{\eta}_k(t) \dot{U}_{\text{из}}(t - \tau_k) (L_p(k))^{-1} e^{-j2\pi f_{\text{из}} \tau_k}. \quad (1)$$

Математическая модель полезных радиосигналов, принимаемых САП

Радиосигналы, поступающие на вход приемника САП, являются узкополосными. Временные и частотные свойства каждой реализации принимаемого радиосигнала $U_c(t)$ можно описать выражениями:

$$\begin{cases} U_c(t) = \{A_c(t) \cos[2\pi f_c t + \phi_c(t) + \phi_0]\} A_{\text{oc}}; \\ U_c(t) = [U_c^+ \cos(2\pi f_c t) - U_c^- \sin(2\pi f_c t)] A_{\text{oc}}; \\ U_c(t) = \text{Re} \left\{ \dot{U}_c(t) e^{j2\pi f_c t} \right\}; \dot{U}_c(t) = U_c^+(t) + jU_c^-(t); \\ S_c(f) = \int_{-\infty}^{\infty} U_c(t) e^{j2\pi f t} dt, \end{cases} \quad (2)$$

где f_c – несущая частота радиосигнала; A_{oc} – флюктуирующая амплитуда радиосигнала; $A_c(t)$, $\varphi_c(t)$ – закон амплитудной и фазовой модуляции радиосигнала; φ_0 – флюктуирующая начальная фаза радиосигнала; $U_c^\pm(t)$ – квадратуры радиосигнала; $\dot{U}_c(t)$ – комплексная огибающая радиосигнала; $S_c(f)$ – спектр радиосигнала.

В работе [5] проведен анализ математической модели САП и предложен алгоритм подавления проникающей помехи. Такой алгоритм был реализован в цифровом виде с использованием АЦП и сигнального процессора. При разработке алгоритма использован компенсационный способ подавления. Схема способа приведена на рис. 1.

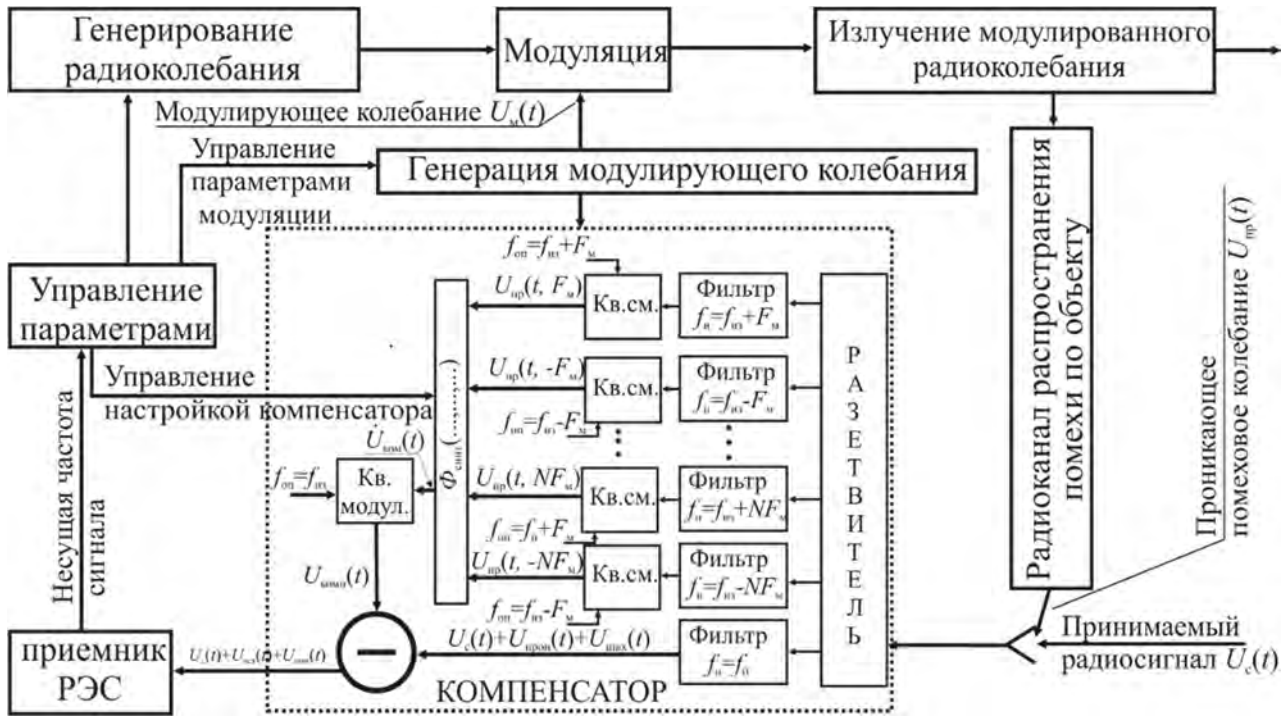


Рис. 1. Обобщенная структурная схема подавления проникающей помехи «компенсационным» способом

В этом случае колебание на входе приемника САП после компенсации проникающей помехи имеет вид

$$U_{вх}(t) = U_0(t) - U_{комп}(t) = U_c(t) + U_{ост п}(t) + U_{ост ш}(t), \quad (3)$$

где $U_{ост п}(t)$ – некомпенсированный остаток проникающей помехи; $U_{ост ш}(t)$ – остаточное шумовое колебание на входе приемника РТР после компенсации помехи.

Для улучшения качества полезного сигнала путем выделения его из смеси принимаемого радиосигнала и помехи необходимо модернизировать процесс фильтрации обработки сигналов. Повысить качество фильтрации можно путем улучшения характеристик фильтров [6].

В данной работе нами для улучшения характеристик фильтров приемников САП предложено проводить корректировку их АЧХ.

Исследование корректоров АЧХ

Корректоры АЧХ – это пассивные сверхвысокочастотные устройства, согласованные в рабочем диапазоне частот, ослабление которых зависит от частоты по определенному закону [7].

Их можно использовать для регулировки глубины провала куполообразной АЧХ [8], изменения наклона характеристики [9], уменьшения частотной неравномерности АЧХ трактов СВЧ [7], других искажений АЧХ СВЧ-трактов [10].

Нами было проведено исследование основных характеристик корректоров на 10 и 8 дБ, оказывающих наибольшее влияние на ЧИС конкретной САП. Были исследованы (по результатам моделирования и расчета с помощью ПО AWR Design) частотные характеристики ослабления и КСВН. На рис. 2 приведена схема корректора на 10 дБ. На рис. 3 приведена топология тонкопленочного

корректора на 10 дБ. Зависимости ослабления (верхняя кривая) и коэффициента стоячей волны по напряжению (верхняя кривая) для различных значений сопротивлений резисторов R1–R3 приведены на рис. 4–9.

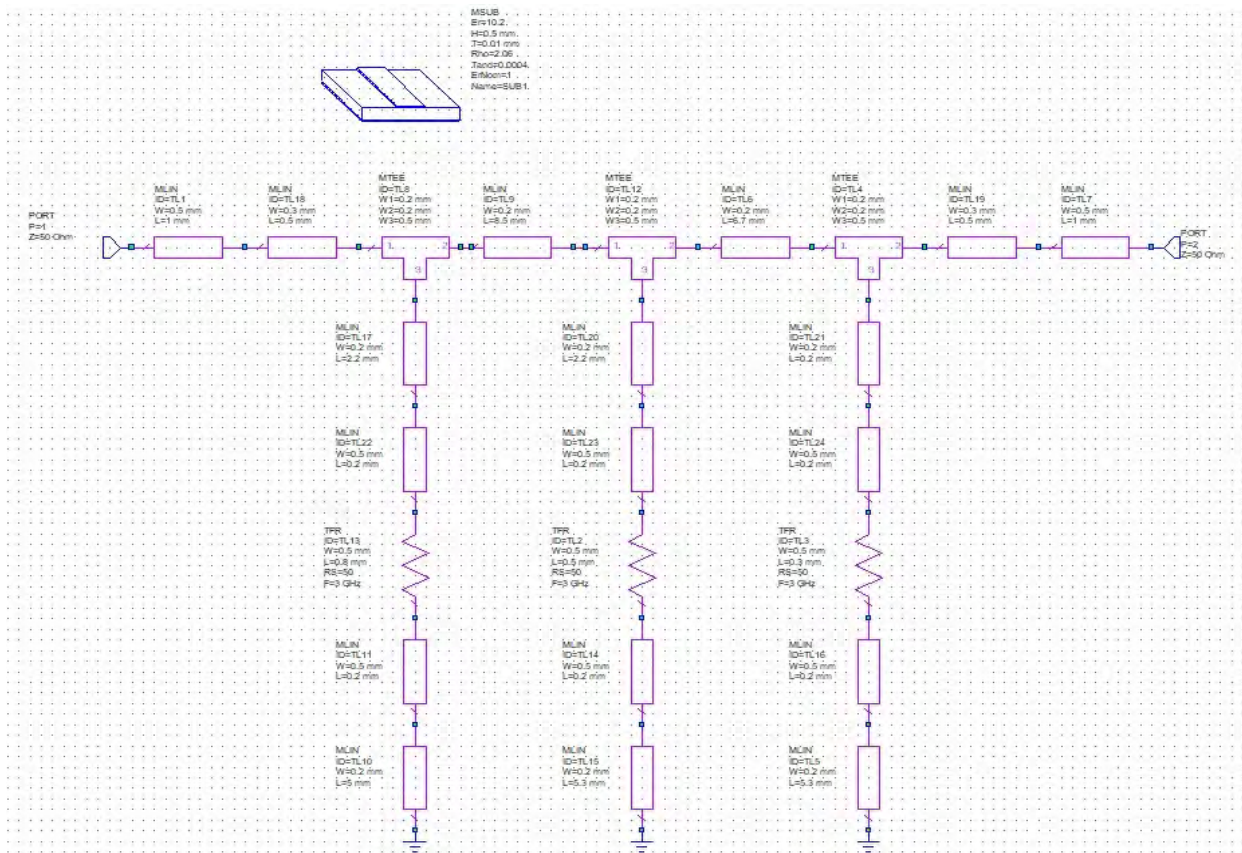


Рис. 2. Схема корректора на 10 дБ

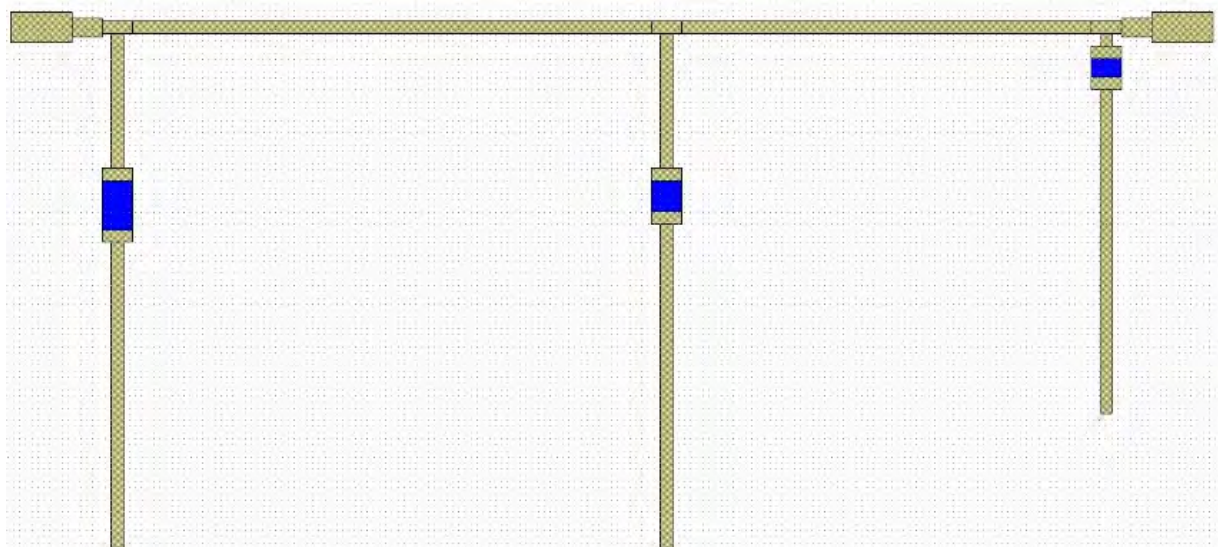


Рис. 3. Топология корректора на 10 дБ

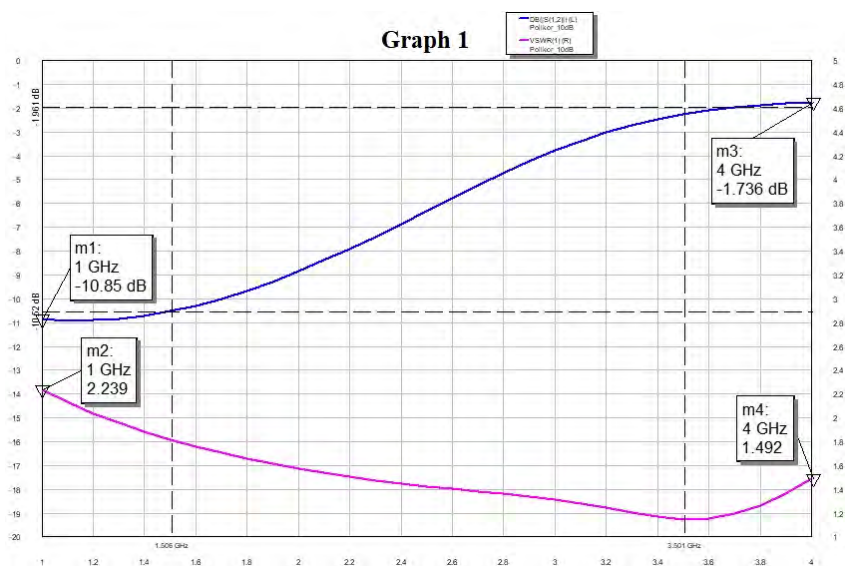


Рис. 4. Зависимости ослабления и КСВН при сопротивлениях резисторов, равных 50 Ом

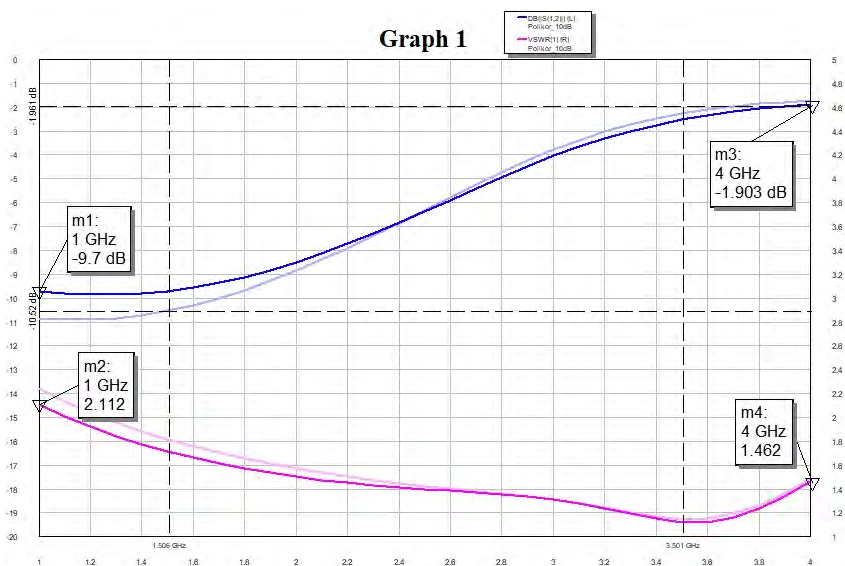


Рис. 5. Ослабление и КСВН при сопротивлениях резисторов, равных 60 Ом

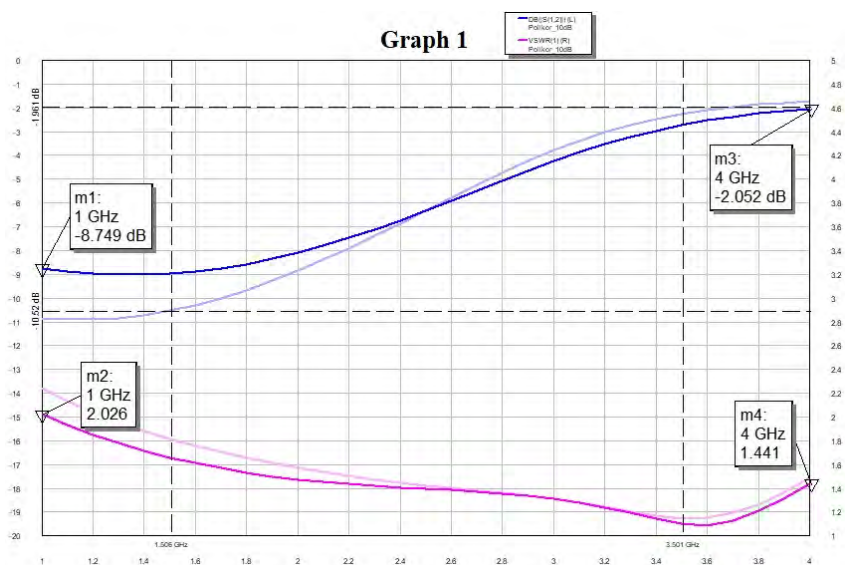


Рис. 6. Ослабление и КСВН при сопротивлениях резисторов, равных 70 Ом

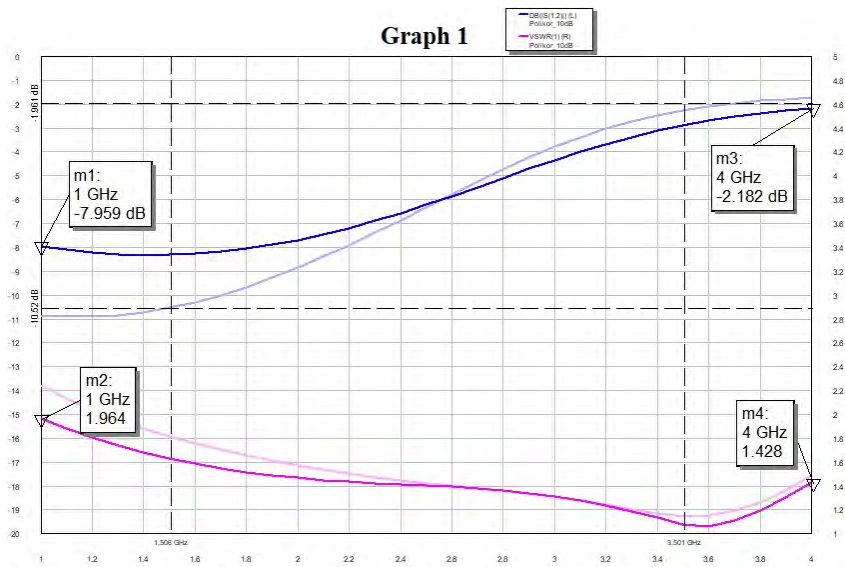


Рис. 7. Ослабление и КСВН при сопротивлениях резисторов, равных 80 Ом

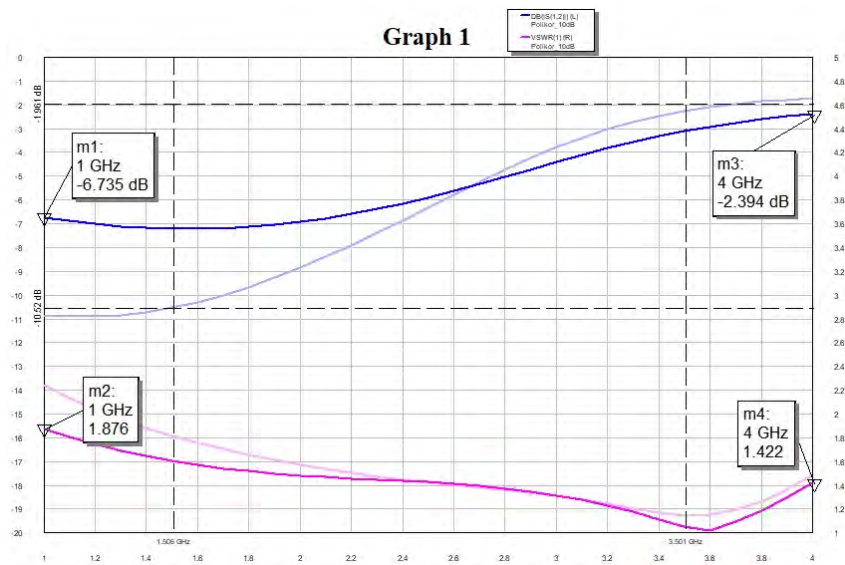


Рис. 8. Ослабление и КСВН при сопротивлениях резисторов, равных 100 Ом

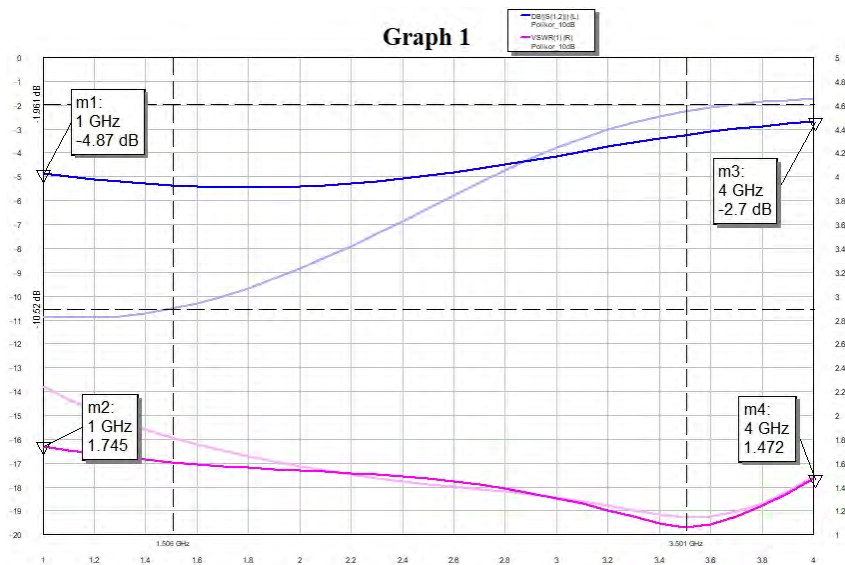


Рис. 9. Ослабление и КСВН при сопротивлениях резисторов, равных 150 Ом

На рис. 10 приведена схема корректора на 8 дБ, а на рис. 11 – его топология. Зависимости ослабления (верхняя кривая) и КСВН (нижняя кривая) приведены на рис. 12–17.

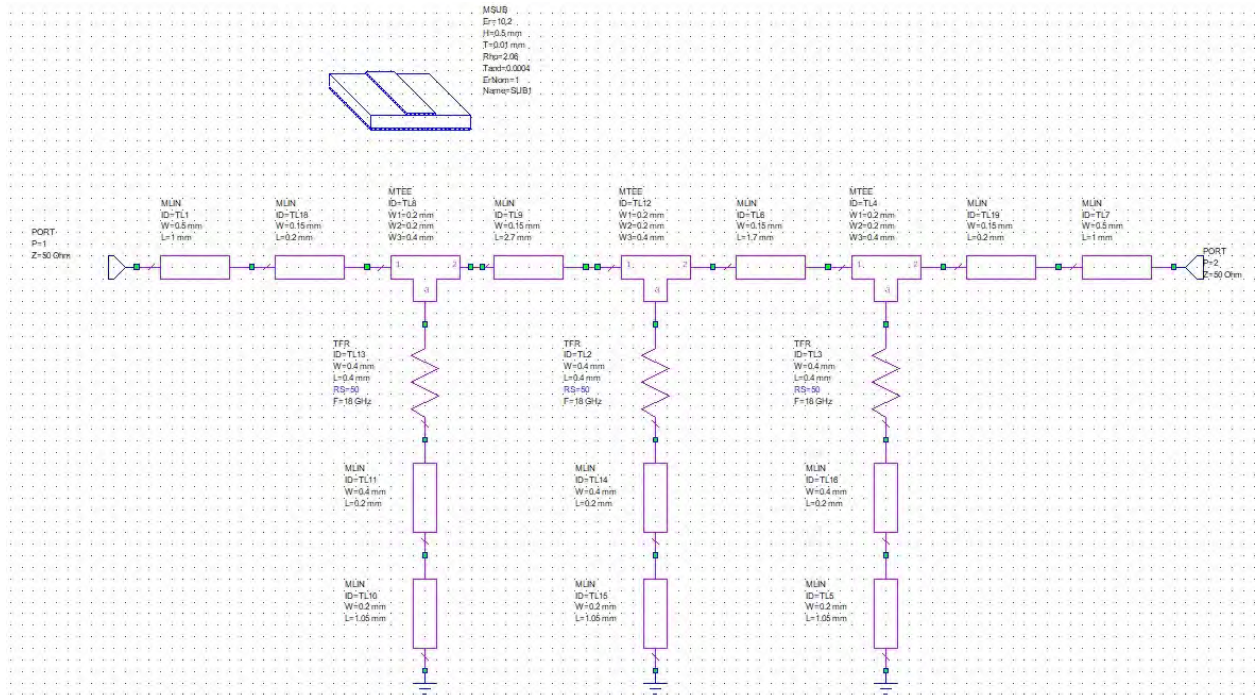


Рис. 10. Схема корректора на 8 дБ

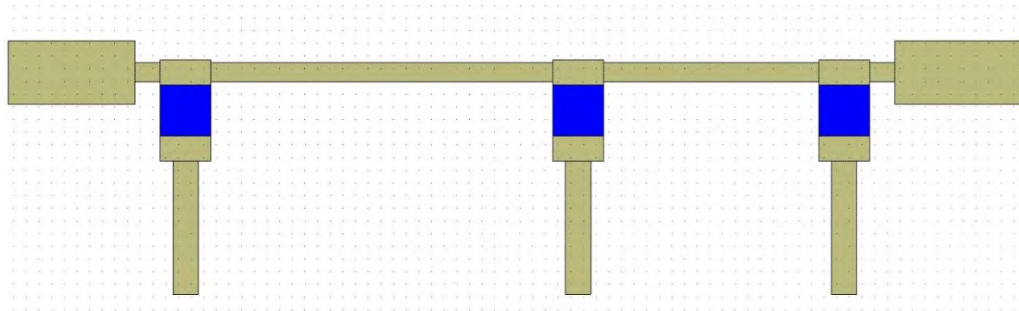


Рис. 11. Топология корректора на 8 дБ

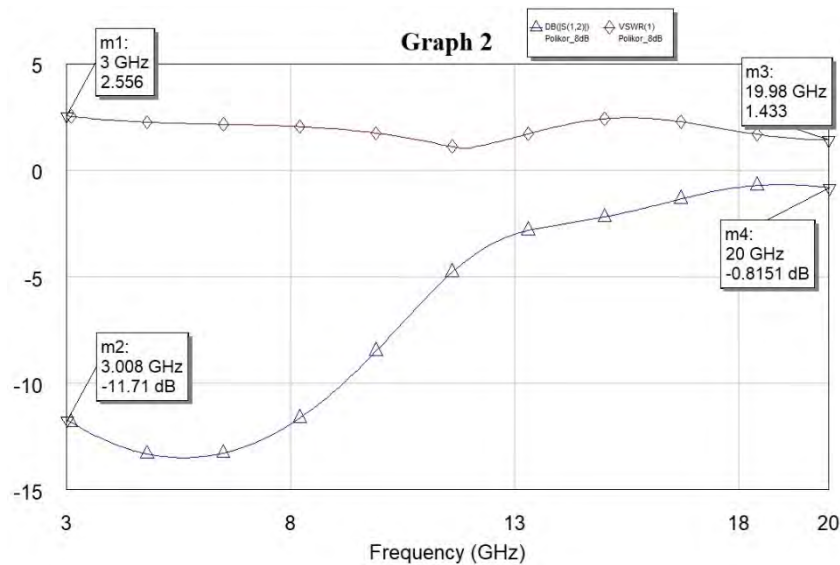


Рис. 12. Зависимости ослабления и КСВН при сопротивлениях резисторов, равных 50 Ом

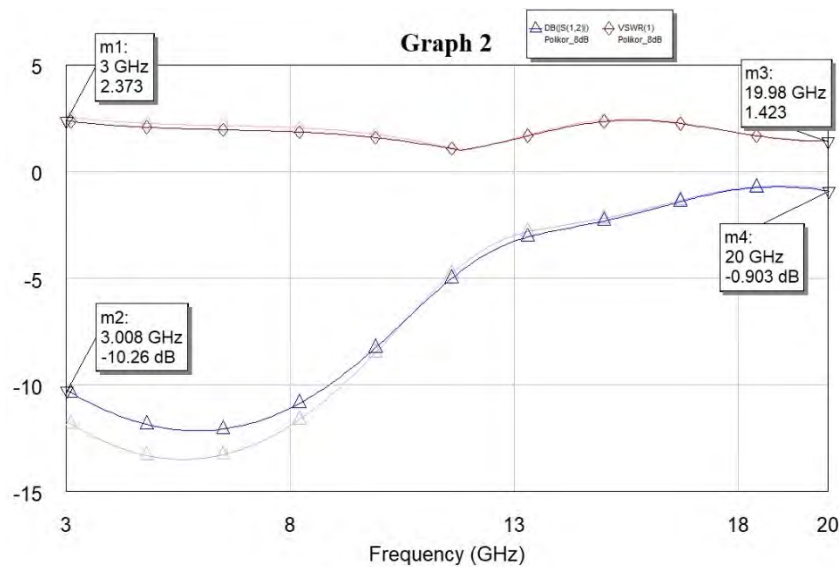


Рис. 13. Ослабление и КСВН при сопротивлениях резисторов, равных 60 Ом

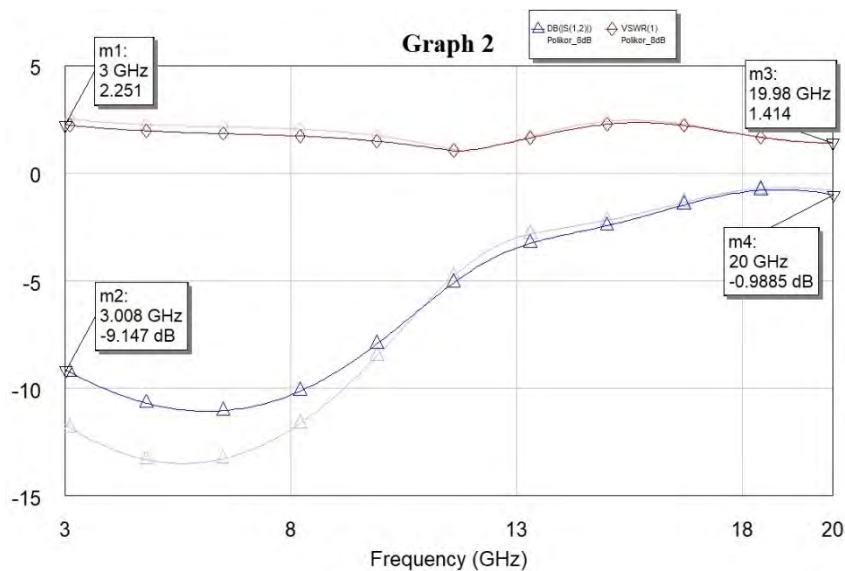


Рис. 14. Ослабление и КСВН при сопротивлениях резисторов, равных 70 Ом

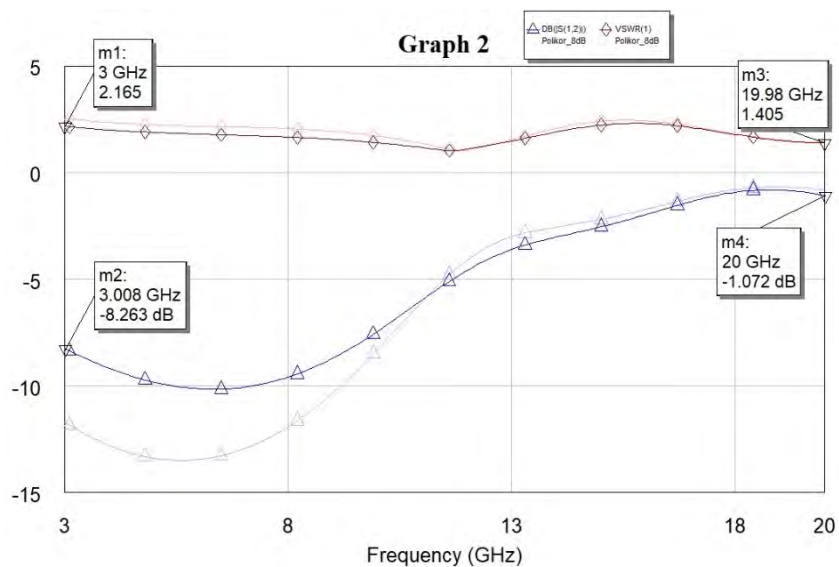


Рис. 15. Ослабление и КСВН при сопротивлениях резисторов, равных 80 Ом

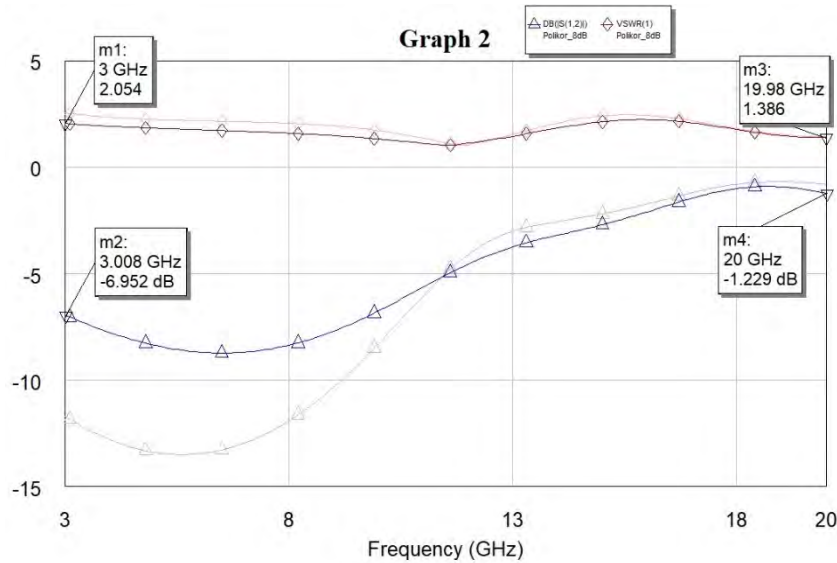


Рис. 16. Ослабление и КСВН при сопротивлениях резисторов, равных 100 Ом

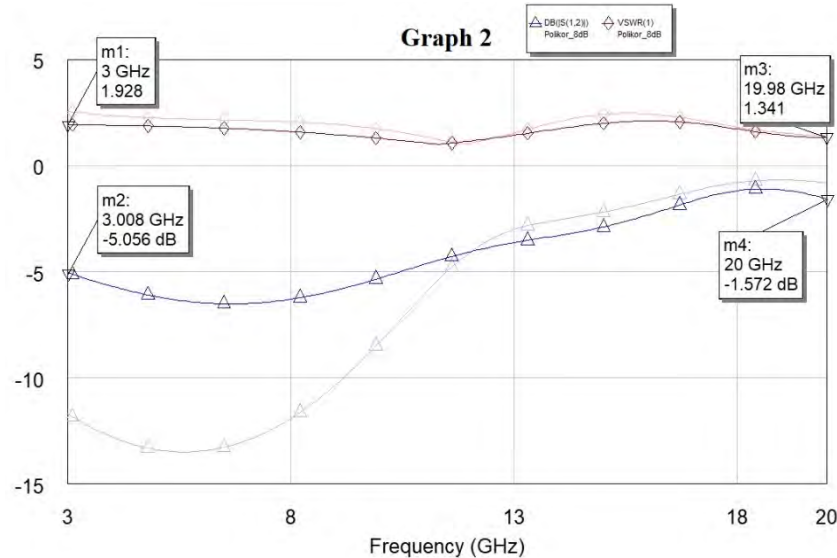


Рис. 17. Ослабление и КСВН при сопротивлениях резисторов, равных 150 Ом

Анализ результатов исследования

Установлено, что с помощью тонкопленочных и толстопленочных корректоров можно устранить разнообразные искажения АЧХ фильтров ЧИС бортовых САП. Предложенные схемы и топологии корректоров позволяют регулировать наклон характеристик до 16 дБ, изменять глубину провала АЧХ, поддерживать КСВН в пределах 1,35...2,5 в рабочем диапазоне частот, уменьшить неравномерность АЧХ до 0,2 дБ, а коэффициент шума – до 2,3...2,4 дБ. Для обеспечения такого уровня показателей требуется производить индивидуальную подгонку сопротивлений резисторов в пределах – 10...+30 % или функциональную по шаблону. Метод факельного разряда обеспечивает более высокую временную стабильность показателей регулировки АЧХ и больший выход годных изделий по сравнению с лазерным методом.

Заключение

Проведенный анализ результатов исследования показал, что тонкопленочные и толстопленочные корректоры АЧХ могут успешно использоваться для регулировки параметров фильтров бортовых частотно-измерительных систем. Это позволяет улучшить качество полезного сигнала, принимаемого станцией активных помех. Предложена методика регулировки АЧХ путем подгонки резисторов корректора методом факельного разряда.

Список литературы

1. Северцев Н. А., Юрков Н. К., Гришко А. К. К проблеме глобальной оптимизации параметров надежности и безопасности сложных динамических систем инверсным методом // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 1. С. 13–23.
2. Клячкин В. Н., Карпунина И. Н. Статические методы оценки стабильности функционирования технических систем // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 2. С. 36–42.
3. Маклашов В. А. Подавление проникающих помех на входе приемников // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2020. Т. 2. С. 22–26.
4. Маклашов В. А., Пиганов М. Н. Методы подавления помех на входе приемников станций активных помех // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика : тез. докл. 26-й Междунар. науч.-техн. конф. (12–13 марта 2020). М. : Центр полиграфических услуг «Радуга», 2020. С. 71.
5. Маклашов В. А., Пиганов М. Н. Математическая модель функционирования станции активных помех // Труды МАИ. 2020. № 113. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=118081>
6. Буренко Е. А., Нестеров С. В. Проектирование активных частотно-избирательных фильтров // Труды МАИ. 2018. № 101. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=97011>
7. Петренко В. П. Сверхвысокочастотные корректоры амплитудно-частотных характеристик // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2015. Т. 5. С. 88–92.
8. Григорьев А. Д. Электродинамика и техника СВЧ : учебник для вузов по специальности «Электронные приборы и устройства». М. : Высш. шк., 2007. 703 с.
9. Трофименков В. В., Хрипко В. А. Корректор наклона АЧХ L-диапазона, выполненный на трехслойной структуре // Общие вопросы радиоэлектроники. 2006. Вып. 2.
10. Егоров Г. А., Капкин С. П., Стельмахович Л. А. [и др.]. Многослойные керамические микросхемы на основе LTCC-технологии // Электроника: наука, технология, бизнес. 2006. № 5. С. 42–45.

References

1. Severtsev N.A., Yurkov N.K., Grishko A.K. On the problem of global optimization of reliability and safety parameters of complex dynamic systems by the inverse method. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(1):13–23. (In Russ.)
2. Klyachkin V.N., Karpunina I.N. Static methods for assessing the stability of the functioning of technical systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2018;(2):36–42. (In Russ.)
3. Maklashov V.A. Suppression of penetrating interference at the input of receivers. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2020;2:22–26. (In Russ.)
4. Maklashov V.A., Piganov M.N. Methods of interference suppression at the input of receivers of active interference stations. *Radioelektronika, elektrotehnika i energetika: tez. dokl. 26-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (12–13 marta 2020) = Radioelectronics, electrical engineering and power engineering : thesis of the 26th International Scientific and Technical Conference. conf. (March 12-13, 2020)*. Moscow: Tsentr poligraficheskikh uslug «Raduga», 2020:71. (In Russ.)
5. Maklashov V.A., Piganov M.N. Mathematical model of the functioning of the active interference station. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2020;(113). (In Russ.). Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=118081>
6. Burenko E.A., Nesterov S.V. Designing active frequency selective filters. *Trudy MAI = Proceedings of MAI*. 2018;(101). (In Russ.). Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=97011>
7. Petrenko V.P. Ultrahigh frequency correctors of amplitude-frequency characteristics. *Elektronika i mikroelektronika SVCh = Electronics and microelectronics of microwave*. 2015;5:88–92. (In Russ.)
8. Grigor'ev A.D. *Elektrodinamika i tekhnika SVCh: uchebnik dlya vuzov po spetsial'nosti «Elektronnye pribory i ustroystva» = Electrodynamics and microwave technology : textbook for universities specializing in Electronic devices and devices*. Moscow: Vyssh. shk., 2007:703. (In Russ.)
9. Trofimenkov V.V., Khripko V.A. L-band frequency response tilt corrector made on a three-layer structure. *Obshchie voprosy radioelektroniki = General issues of radio electronics*. 2006;(2). (In Russ.)
10. Egorov G.A., Kapkin S.P., Stel'makhovich L.A. et al. Multilayer ceramic chips based on LTCC technology. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes = Electronics: science, technology, business*. 2006;(5):42–45. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Николаевич Новомейский
аспирант,
Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С. П. Королёва
(Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: kipres@ssau.ru

Dmitry N. Novomeisky
Postgraduate student,
Samara National Research University
(34 Moscow highway, Samara, Russia)

Михаил Николаевич Пиганов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры конструирования
и технологии электронных систем и устройств,
Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С. П. Королёва
(Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: kipres@ssau.ru

Антон Алексеевич Лупцов

аспирант,
Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С. П. Королёва
(Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: kipres@ssau.ru

Валерий Петрович Перевертов

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

Mikhail N. Piganov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of construction and technology
of electronic systems and devices department,
Samara National Research University
(34 Moscow highway, Samara, Russia)

Anton A. Luptsov

Postgraduate student,
Samara National Research University
(34 Moscow highway, Samara, Russia)

Valeriy P. Perevertov

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

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

Поступила в редакцию/Received 10.02.2024

Поступила после рецензирования/Revised 20.02.2024

Принята к публикации/Accepted 10.03.2024

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ БОЕПРИПАСОВ С МАЛОЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ К ВНЕШНИМ ТЕПЛОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ ВЗРЫВЧАТЫМИ СОСТАВАМИ

А. А. Ошкин¹, Д. Ф. Филиппов², А. И. Годунов³

^{1, 2} Филиал Военной академии материально-технического обеспечения имени
генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе, Пенза, Россия

³ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ oshkin.aa@mail.ru, ² filippov.dima@mail.ru, ³ godunov@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Актуальность темы обусловлена ее практической значимостью для решения задач эксплуатационной безопасности боеприпасов, находящихся на объектах хранения, когда необходимо знать время взрыва изделий. Предложена разработанная аналитическая модель определения допустимого времени воздействия на боеприпасы поражающих факторов внешней среды (молнии и ландшафтного пожара). *Материалы и методы.* Моделирование процесса возникновения аварийных ситуаций при взрыве штатных или перспективных боеприпасов с малочувствительными взрывчатыми составами при внешнем тепловом воздействии можно описать схемой марковского случайного процесса со счетным числом состояний. Использование марковской модели позволяет применить хорошо разработанный и апробированный математический аппарат и получить заведомо надежный результат вследствие принятых достаточно жестких ограничений. *Результаты и выводы.* Таким образом, разработанная аналитическая модель определения допустимого времени воздействия на боеприпасы поражающих факторов внешней среды может быть использована для прогнозирования эксплуатационной безопасности изделий, находящихся на хранении или в сборочно-ремонтном производстве арсеналов комплексного хранения ракет и боеприпасов. Полученный алгоритм определения допустимого времени воздействия на боеприпасы поражающих факторов внешней среды целесообразно использовать при разработке перспективных боеприпасов с малочувствительными взрывчатыми составами.

Ключевые слова: эксплуатационная безопасность, поражающие факторы внешней среды, аналитическая модель, тепловое воздействие, боеприпас

Для цитирования: Ошкин А. А., Филиппов Д. Ф., Годунов А. И. Методика оценки эксплуатационной безопасности боеприпасов с малочувствительными к внешним тепловым воздействиям взрывчатыми составами // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 81–87. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-9

METHODOLOGY FOR ASSESSING THE OPERATIONAL SAFETY OF AMMUNITION WITH EXPLOSIVES THAT ARE INSENSITIVE TO EXTERNAL THERMAL INFLUENCES

A.A. Oshkin¹, D.F. Filippov², A.I. Godunov³

^{1, 2} Branch of the Military Academy of Logistics named after Army General A.V. Khrulev in Penza, Penza, Russia

³ Penza State University, Penza, Russia

¹ oshkin.aa@mail.ru, ² filippov.dima@mail.ru, ³ godunov@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The relevance of the article is due to its practical significance for solving the problems of operational safety of ammunition located at storage facilities, when it is necessary to know the time of explosion of products. The article proposes a developed analytical model for determining the permissible exposure time for ammunition to damaging environmental factors (lightning and landscape fire). *Materials and methods.* Modeling of the process of emergency situations during the explosion of standard or promising ammunition with low-sensitivity explosive compositions under external thermal influence can be described by a Markov random process scheme with a countable number of states. The use of the Markov model makes it possible to apply a well-developed and proven mathematical apparatus and obtain a deliberately reliable result due to the rather strict restrictions adopted. *Results and conclusions.* Thus, the developed analytical model for determining the permissible exposure time for ammunition to damaging environmental factors can be used to predict the operational safety of products in storage or in the assembly and repair production of arsenals for complex storage of missiles and ammunition. The obtained algorithm for determining the

permissible time of exposure to damaging environmental factors on ammunition is advisable to use in the development of promising ammunition with low-sensitivity explosive compositions.

Keywords: operational safety, damaging environmental factors, analytical model, thermal impact, ammunition

For citation: Oshkin A.A., Filippov D.F., Godunov A.I. Methodology for assessing the operational safety of ammunition with explosives that are insensitive to external thermal influences. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):81–87. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-9

Введение

В последние годы особое внимание при разработке боеприпасов уделяется вопросам обеспечения их безопасности, сохранности и защищенности на всех стадиях жизненного цикла, моделированию аварийных ситуаций и прогнозированию их последствий, повышению безопасности боеприпасов при несанкционированных действиях. В последние годы из-за несанкционированных действий на боеприпасы, хранимые на арсеналах, экономике страны нанесен огромный ущерб.

Анализируя содержание операционной деятельности применительно к боеприпасам на различных этапах жизненного цикла, можно отметить, что ее суть сводится к оценке безопасности, надежности и эффективности действия после того, как на них осуществлены различные внешние опасные воздействия [1].

Поскольку избежать единичного взрыва боеприпасов практически невозможно, особенно при террористических действиях, то основная задача состоит в том, чтобы этот единичный взрыв не привел к цепной реакции – массовым взрывам других средств поражений, находящихся на арсенале или в боекомплекте носителя боеприпасов (танка, самоходной артиллерийской установки, автомобиля и т.д.).

Методика оценки и прогнозирования эксплуатационной безопасности

Достаточно строгим методом исследования боя является его описание с помощью вероятностных моделей [2]. В отличие от аналитических моделей вероятностные модели учитывают стохастический характер протекания боя и позволяют более полно его проанализировать. Широкое распространение получили вероятностные модели, построенные на основе марковских и полумарковских процессов [3].

Время несанкционированного внешнего теплового воздействия на боеприпасы в форме быстрого или медленного нагрева несравнимо мало со временем их хранения, поэтому правомерным является применение в данном случае вероятностных моделей на основе марковских процессов.

Моделирование процесса возникновения аварийных ситуаций при взрыве штатных или перспективных боеприпасов с малочувствительными взрывчатыми составами при внешнем тепловом воздействии можно описать схемой марковского случайного процесса со счетным числом состояний (особо опасных операций) $S_i(t), i = \overline{1, n}$, и непрерывным временем при учете гипотез, рассматриваемых в области ограничений $\Omega(t)$ и векторов управляющих воздействий $\overline{K(t)}$.

Область ограничений $\Omega(t)$ представляет возможность пребывания боеприпасов в аварийной ситуации при внешнем тепловом воздействии к моменту времени t . Совокупность векторов управляющих воздействий $\overline{K(t)}$ включает временные параметры развития аварийной ситуации при внешнем тепловом воздействии на боеприпас.

Использование марковской модели позволяет применить хорошо разработанный и апробированный математический аппарат и получить заведомо надежный результат вследствие принятых достаточно жестких ограничений при разработке самого аппарата.

На рис. 1 приведен граф состояний штатных или перспективных боеприпасов с малочувствительными взрывчатыми составами, находящимися на площадке открытого хранения, в результате внешнего теплового воздействия, вызванного, например, ландшафтным пожаром соседнего штабеля с артиллерийскими выстрелами, хранящимися тоже на площадке открытого хранения.

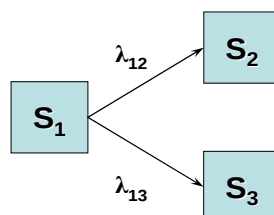


Рис. 1. Граф состояний боеприпасов при внешнем тепловом воздействии

В соответствии с графом состояний и принятой схемой полная группа состояний боеприпаса включает в себя: S_1 – исходное состояние боеприпаса перед внешним тепловым воздействием; S_2 – аварийное состояние боеприпаса в результате их взрыва, когда время теплового воздействия сравнялось или превысило время задержки вспышки взрывчатого состава боеприпаса; S_3 – безаварийное состояние боеприпаса, когда время теплового воздействия не превысило время задержки вспышки взрывчатого состава.

В соответствии с расчетной схемой можно составить систему дифференциальных уравнений А. Н. Колмогорова. Она имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}\frac{dp_1}{dt} &= -(\lambda_{12} + \lambda_{13}) p_1; \\ \frac{dp_2}{dt} &= \lambda_{12} p_1; \\ \frac{dp_3}{dt} &= \lambda_{13} p_1,\end{aligned}\tag{1}$$

где p_i – вероятность нахождения боеприпасов в i -м состоянии; λ_{ij} – плотность вероятности перехода боеприпасов из i -го в j -е состояние.

Случайными временными величинами, характеризующими переход комплектующих элементов боеприпасов в состояния S_{ij} , являются $\bar{t}_{\text{возд}}$ и $\bar{t}_{\text{вспыш}}$.

Величина $\bar{t}_{\text{возд}}$ представляет собой математическое ожидание времени внешнего теплового воздействия на боеприпас.

Величина $\bar{t}_{\text{вспыш}}$ – математическое ожидание времени задержки вспышки штатного и малочувствительного взрывчатого состава.

Вероятности переходов p_{ij} можно выразить через времена теплового воздействия и задержки вспышки:

$$p_{12} = \frac{\bar{t}_{\text{возд}}}{\bar{t}_{\text{возд}} + \bar{t}_{\text{вспыш}}}; \quad p_{13} = \frac{\bar{t}_{\text{вспыш}}}{\bar{t}_{\text{возд}} + \bar{t}_{\text{вспыш}}}.\tag{2}$$

Тогда плотности вероятности перехода боеприпасов из состояния S_1 в состояния S_2 и S_3 можно описать следующими выражениями:

$$\lambda_{12} = \frac{\bar{t}_{\text{возд}}}{\bar{t}_{\text{возд}} (\bar{t}_{\text{вспыш}} + \bar{t}_{\text{возд}})}; \quad \lambda_{13} = \frac{\bar{t}_{\text{вспыш}}}{\bar{t}_{\text{вспыш}} (\bar{t}_{\text{вспыш}} + \bar{t}_{\text{возд}})}.\tag{3}$$

Полученные выражения являются уравнениями связи. Начальными условиями решения системы уравнений (2) и (3) являются условия, что при $t = 0$ $P_1(t) = 1$, $P_2(t) = 0$ и $P_3(t) = 0$.

Они включают обыкновенные уравнения и решаются численно методом Рунге – Кутты в информационной среде *Mathcad 15*.

Контроль правильности решения системы уравнений осуществляется по условию нормировки, т.е.

$$\sum_{i=1}^n p_i = 1.$$

Задачу оценки и прогнозирования эксплуатационной безопасности штатных и перспективных боеприпасов с малочувствительными к внешним тепловым воздействиям взрывчатым составом можно решить и аналитическим способом. Система дифференциальных уравнений тогда будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned}p_1(t) &= p_{10} e^{-(\lambda_{12} + \lambda_{13})t}; \\ p_2(t) &= p_{20} + \frac{\lambda_{12} p_{10}}{\lambda_{12} + \lambda_{13}} \left[1 - e^{-(\lambda_{12} + \lambda_{13})t} \right];\end{aligned}\tag{4}$$

$$p_3(t) = p_{30} + \frac{\lambda_{13} p_{10}}{\lambda_{12} + \lambda_{13}} \left[1 - e^{-(\lambda_{12} + \lambda_{13})t} \right],$$

где p_{10}, p_{20}, p_{30} – начальные значения вероятностей состояния.

Разработанные модели решения задачи оценки и прогнозирования тепловой стойкости штатного и перспективного снаряжения боеприпасов положены в основу предлагаемой методики. Блок-схема методики прогнозирования эксплуатационной безопасности штатных и перспективных боеприпасов представлена на рис. 2.

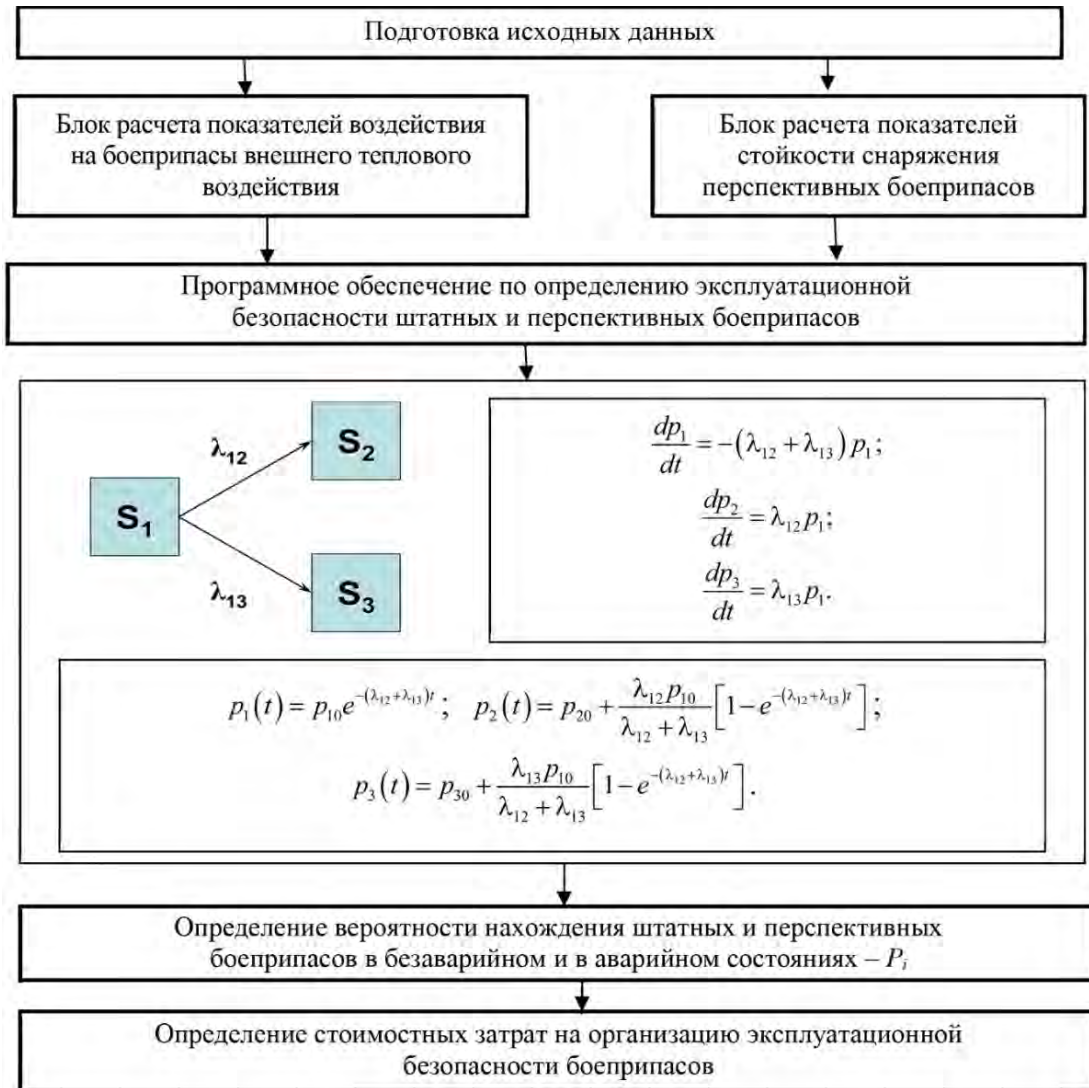


Рис. 2. Структурная блок-схема методики

Функционально структурная блок-схема методики состоит из трех модулей: модуль исходной информации, модуль функциональный и модуль информационный.

В свою очередь каждый модуль содержит блоки. Модуль исходной информации включает: блок расчета показателей внешнего теплового воздействия на боеприпасы и блок расчета показателей тепловой стойкости снаряжения перспективных боеприпасов. Выходным параметром модуля исходной информации является время задержки вспышки малочувствительного взрывчатого состава $t_{\text{вспыш}}$, по истечении которого происходит взрыв боеприпаса [4].

Функциональный модуль является основным и содержит вероятностную и аналитическую математические модели, прогнозирующие вероятности нахождения боеприпасов в безаварийном или в аварийном состояниях при времени $t_{\text{возд}}$ внешнего теплового воздействия. В блоках функционального модуля производятся решения уравнений численным методом Рунге – Кутты 4-го порядка и аналитическим методом по определению вероятности P_i нахождения боеприпасов в безаварийном или

в аварийном состоянии. Завершающим блоком функционального модуля является определение стоимостных затрат на организацию эксплуатационной безопасности боеприпасов.

Информационный блок представляет на экран или листинг графическую или табличную информацию, полученную по результатам вычислительных экспериментов. Программное обеспечение методики оценки и прогнозирования эксплуатационной безопасности штатных и перспективных боеприпасов с малочувствительными взрывчатыми составами к внешнему тепловому воздействию представляет собой программный продукт «Оценка и прогнозирование эксплуатационной безопасности боеприпасов», структура которого смоделирована в среде *MathCad 15*.

Вычислительный эксперимент по определению вероятности взрыва штатных боеприпасов при внешнем тепловом воздействии в виде медленного нагрева проводился при значениях временных характеристик, приведенных в табл. 1.

Таблица 1

Численные значения временных характеристик для штатных боеприпасов

Номер варианта	МОЖ времени теплового воздействия, $t_{\text{возд}}$, ч.	МОЖ времени вспышки ВВ, $t_{\text{вспыш}}$, ч.
1	13	15
2	16	15

Начальные условия: при $t = 0$ $P_1 = 1$, $P_2 = 0$, $P_3 = 0$.

Результаты решения системы дифференциальных уравнений приведены на рис. 3.

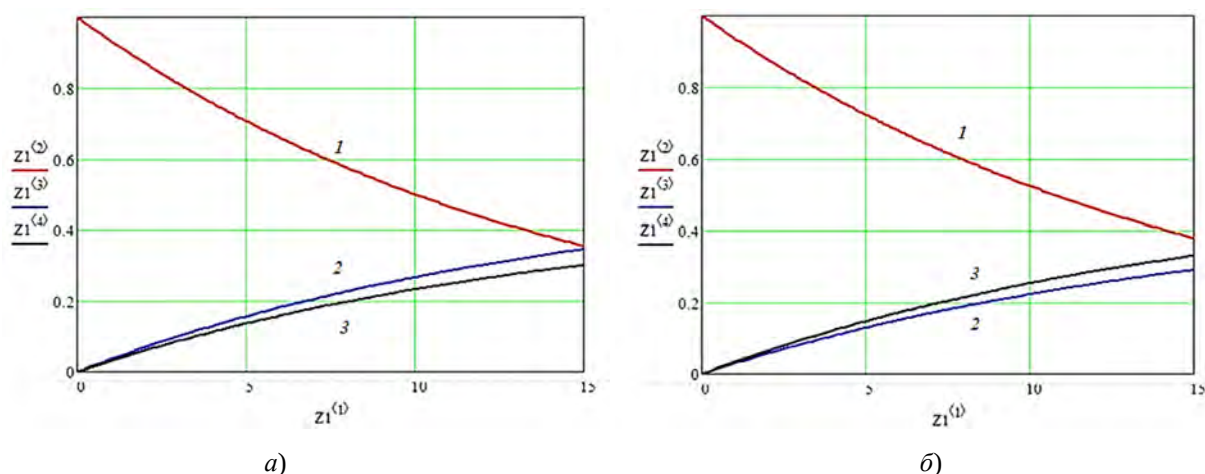


Рис. 3. Вероятности возникновения аварийной ситуации для штатных боеприпасов при времени теплового воздействия, меньшем (а) и большем (б) времени задержки вспышки:

- 1 – вероятность нахождения боеприпасов в исходном состоянии до начала теплового воздействия;
- 2 – вероятность нахождения боеприпасов в аварийном состоянии после теплового воздействия;
- 3 – вероятность нахождения боеприпасов в безопасном состоянии после теплового воздействия

Вычислительный эксперимент по определению вероятности взрыва перспективных боеприпасов, содержащих малочувствительные взрывчатые составы, при внешнем тепловом воздействии в виде медленного нагрева проводился при значениях временных характеристик, приведенных в табл. 2.

Таблица 2

Численные значения временных характеристик для перспективных боеприпасов

Номер варианта	МОЖ времени теплового воздействия, $t_{\text{возд}}$, ч	МОЖ времени вспышки ВВ, $t_{\text{вспыш}}$, ч
1	23	24
2	26	24

Начальные условия: при $t = 0$ $P_1 = 1$, $P_2 = 0$, $P_3 = 0$.

Результаты решения системы дифференциальных уравнений приведены на рис. 4.

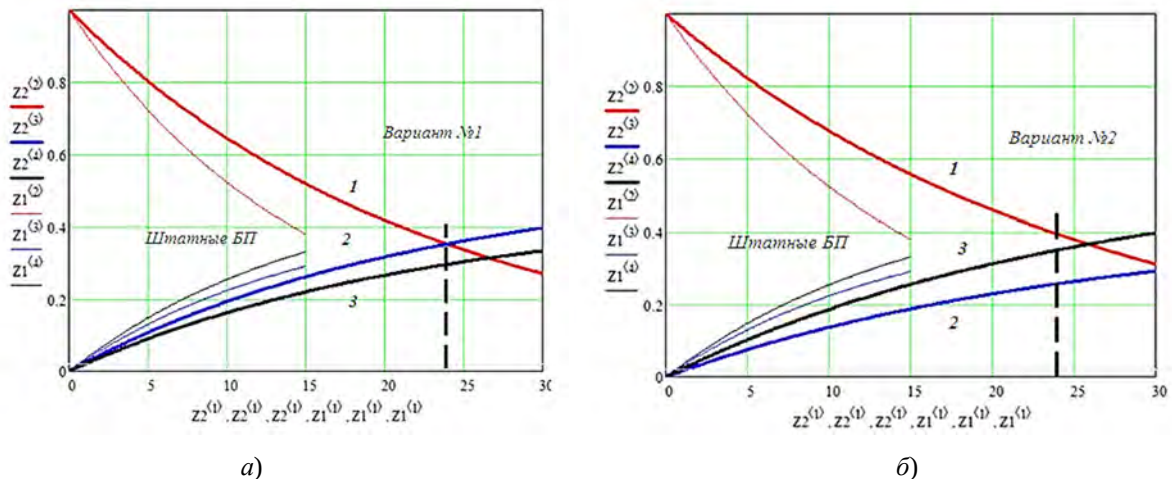


Рис. 4. Вероятности возникновения аварийной ситуации для перспективных боеприпасов при времени теплового воздействия, меньшем (а) и большем (б) времени задержки вспышки:

- 1 – вероятность нахождения боеприпасов в исходном состоянии до начала теплового воздействия;
- 2 – вероятность нахождения боеприпасов в аварийном состоянии после теплового воздействия;
- 3 – вероятность нахождения боеприпасов в безопасном состоянии после теплового воздействия

Анализ графиков показывает, что безопасное время внешнего теплового воздействия на перспективные боеприпасы, содержащие малочувствительные взрывчатые составы, значительно увеличилось и составило 60 %, поэтому возможность проведения работ по предупреждению взрыва также возросло. Вероятность нахождения перспективных боеприпасов в безопасном состоянии при медленном тепловом нагреве по сравнению со штатными повысилась с 0,38 до 0,55 (на 45 %), что свидетельствует об увеличении их эксплуатационной безопасности.

Заключение

Таким образом, разработанная методика определения допустимого времени воздействия на боеприпасы поражающих факторов внешней среды может быть использована для прогнозирования эксплуатационной безопасности изделий, находящихся на хранении или в сборочно-ремонтном производстве арсеналов комплексного хранения ракет и боеприпасов. Алгоритм определения допустимого времени воздействия на боеприпасы поражающих факторов внешней среды целесообразно использовать при разработке перспективных боеприпасов с малочувствительными разрывными составами. Алгоритм позволяет определить, каким должно быть допустимое время воздействия на боеприпас поражающих факторов внешней среды в виде молнии или ландшафтного пожара $t_{\text{возд}}$, чтобы в момент времени t вероятность нахождения боеприпасов в состоянии S_1 (исходное состояние) или в S_3 (безаварийное состояние) составляла бы значение p_1 , если в начальный момент времени она равна $p_1 0$.

Список литературы

1. Китаев В. Н. Оптимальные пути решения конструкторских задач на примере создания надежного электро-механического поляризованного переключателя // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2015. Т. 2. С. 113–116.
2. Пискунов Н. С. Дифференциальное и интегральное исчисления для втузов : учеб. пособие для втузов. 13-е изд. М. : Наука, 1985. Т. 2. 560 с.
3. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М. : Наука, 1969. 564 с.
4. Северцев Н. А., Зацаринный А. А. Учет случайности нагрузки и прочности в расчетах надежности конструкций оборонных технических систем для безопасной работы // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 4. С. 90–96.

References

1. Kitaev V.N. Optimal ways to solve design problems by the example of creating a reliable electromechanical polarized switch. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2015;2:113–116. (In Russ.)

2. Piskunov N.S. *Differentsial'noe i integral'noe ischisleniya dlya vtuzov: ucheb. posobie dlya vtuzov. 13-e izd. = Differential and integral calculus for higher education institutions : a textbook for higher education institutions. 13th ed.* Moscow: Nauka, 1985;2:560. (In Russ.)
3. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnostey = Theory of probability.* Moscow: Nauka, 1969:564. (In Russ.)
4. Severtsev N.A., Zatsarinnyy A.A. Taking into account the randomness of load and strength in calculations of reliability of structures of defense technical systems for safe operation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2017;(4):90–96. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Александрович Ошкин

кандидат технических наук,
начальник отдела организации научной работы
и подготовки научно-педагогических кадров,
Филиал Военной академии материально-
технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе
(Россия, Пензенская область, Военный городок)
E-mail: oshkin.aa@mail.ru

Дмитрий Федорович Филиппов

адъюнкт,
Филиал Военной академии материально-
технического обеспечения
имени генерала армии А. В. Хрулева в г. Пензе
(Россия, Пензенская область, Военный городок)
E-mail: filippov.dima@mail.ru

Анатолий Иванович Годунов

доктор технических наук, профессор,
заслуженный деятель науки РФ,
профессор кафедры автоматики и телемеханики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: godunov@pnzgu.ru

Aleksandr A. Oshkin

Candidate of technical sciences,
head of the department of organization of scientific work
and training of scientific and pedagogical personnel,
Branch of the Military Academy of Logistics
named after Army General A.V. Khrulev in Penza
(Military town, Penza region, Russia)

Dmitry F. Filippov

Adjunct,
Branch of the Military Academy of Logistics
named after Army General A.V. Khrulev in Penza
(Military town, Penza region, Russia)

Anatoly I. Godunov

Doctor of technical sciences, professor,
the honoured worker of science
of the Russian Federation,
professor of the sub-department
of automation and telemechanics,
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 11.01.2024

Поступила после рецензирования/Revised 22.02.2024

Принята к публикации/Accepted 09.03.2024

ИНЕРЦИОННЫЙ ВКЛЮЧАТЕЛЬ С ГИДРАВЛИЧЕСКИМ ДЕМПФИРОВАНИЕМ ИНЕРЦИОННОГО ТЕЛА

В. Н. Китаев¹, Р. Л. Афанасьев², М. В. Петров³

^{1, 2, 3} Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск, Челябинская обл., Россия
¹ kb2@uniitf.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Инерционные включатели используются в подвижных объектах для коммутации электрических цепей технических систем. Срабатывание подобных приборов происходит в основном при наборе интеграла линейного ускорения, с которым объект перемещается в пространстве. Для интегрирования линейного ускорения традиционно используются магнитоиндукционные и гидравлические демпферы. В ряде случаев гидравлические демпферы как упрощающие конструкции инерционных включателей более предпочтительны. В работе представлены результаты разработки конструкции инерционного включателя с гидравлическим демпфированием инерционного тела, приведена его математическая модель – составленные дифференциальные уравнения, описывающие движения подвижных конструктивных элементов, а также условия начала движения. *Материалы и методы.* При составлении дифференциальных уравнений были приняты следующие допущения: жидкость считаем несжимаемой; изменения размеров деталей инерционного включателя за счет изменения температуры окружающей среды от номинальной не учитываются; изменение вязкости демпфирующей жидкости от изменения температуры окружающей среды от нормальной не учитывается. Основная особенность разработанной конструкции инерционного включателя, отличающая его от инерционных приборов аналогичного назначения, – использование дополнительной магнитной системы, обеспечивающей «падающую» силовую характеристику системы инерционное тело – рабочая пружина с минимальным силовым воздействием магнитной системы на инерционное тело на начальном участке его движения и резко возрастающем силовом воздействии на конечном участке, достаточным для надежного переключения контактной системы с увеличенным количеством контактов, обеспечивающих пропускание токов в широком диапазоне значений с малыми падением напряжения в контактном переходе. Переключение контактной системы из исходного состояния происходит при поступательном перемещении переключателя контактной системы навстречу инерционному телу с преодолением усилия рабочей пружины и сил инерции, действующих на переключатель. Конструкция разработанного инерционного включателя обеспечивает специально введенными блокирующими элементами надежное сохранение исходного состояния контактной системы во всех условиях эксплуатации подвижных объектов, в которых он может применяться. *Результаты и выводы.* Представленные результаты работ показывают возможность создания надежного и технологичного инерционного включателя, предназначенного для технических систем автономных подвижных объектов.

Ключевые слова: инерционный включатель, гидравлический демпфер, инерционное тело, контактная система, математическая модель, дифференциальные уравнения

Для цитирования: Китаев В. Н., Афанасьев Р. Л., Петров М. В. Инерционный включатель с гидравлическим демпфированием инерционного тела // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 88–97. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-10

INERTIA SWITCH WITH HYDRAULIC DAMPING OF THE INERTIAL BODY

V.N. Kitaev¹, R.L. Afanasiev², M.V. Petrov³

^{1, 2, 3} Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute
of Technical Physics, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia
¹ kb2@uniitf.ru

Abstract. *Background.* Inertial switches are used in mobile objects for switching of electrical circuits of technical systems. Operation of similar devices happens generally at a set of integral of linear acceleration with which an object moves in space. For integration of linear acceleration magnetic-induction and hydraulic dampers are traditionally used. In some cases hydraulic dampers as the simplifying designs of inertial switches, are more preferable. In work results of development of a design of the inertial switch with hydraulic damping of an inertial body are presented, its mathematical model – the worked-out differential equations describing movements of mobile structural elements and also conditions of a start of motion is given. *Materials and methods.* By drawing up the differential equations the following assumptions were accepted: we consider liquid incompressible; changes of the sizes of details of the inertial switch due to temperature

change of the environment from nominal are not considered; change of viscosity of the damping liquid from temperature change of the environment from normal is not considered. The main feature of the developed design of the inertial switch distinguishing it from inertial devices of similar appointment – use of the additional magnetic system providing the «falling» power system performance an inertial body – a working spring with the minimum power impact of a magnetic system on an inertial body on the initial site of its movement and sharply increasing power influence on the final site, sufficient for reliable switching of a contact system with the increased number of the contacts providing transmission of currents in the wide range of values with small voltage drops in contact transition. Switching of a contact system from an initial state happens at forward movement of a switching element of a contact system towards to an inertial body to overcoming effort of a working spring and forces of inertia operating on a switching element. The design of the developed inertial switch provides with specially entered blocking elements reliable preservation of an initial condition of a contact system in all service conditions of mobile objects in which it can be used. *Results and conclusions.* The presented results of works show a possibility of creation of the reliable and technological inertial switch intended for the technical systems of autonomous mobile objects.

Keywords: inertia switch, hydraulic damper, inertial body, contact system, mathematical model, differential equations

For citation: Kitaev V.N., Afanasiev R.L., Petrov M.V. Inertia switch with hydraulic damping of the inertial body. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):88–97. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-10

Необходимость разработки

Для коммутации электрических цепей систем подвижных объектов традиционно используются пороговые инерционные выключатели, коммутирующие электрические цепи технических систем при движении объектов.

Разработанная ранее конструкция инерционного выключателя с гидравлическим демпфированием инерционного тела [1, 2] обеспечивала выполнение предъявленных требований по надежности.

С целью упрощения конструкции и повышения надежности был разработан новый инерционный выключатель [3] с увеличенным количеством контактов, конструкция которого свободна от недостатков прототипа [1].

Конструкция

Конструкция инерционного выключателя приведена на рис. 1, 2.

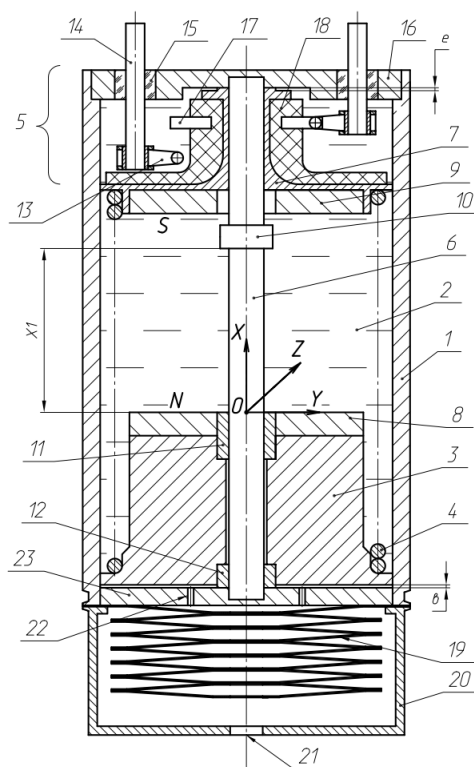


Рис. 1. Инерционный выключатель в исходном состоянии

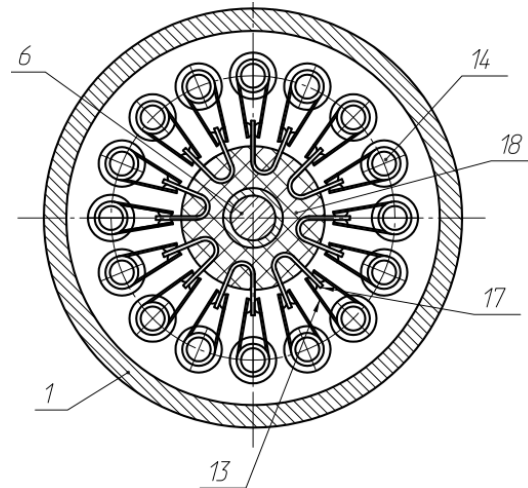


Рис. 2. Контактная система

На рис. 1 приведен осевой разрез инерционного выключателя в исходном состоянии; на рис. 2 – размещение контактов контактной системы; на рис. 3 – графики зависимости усилий, действующих на инерционное тело, от расстояния между постоянными магнитами.

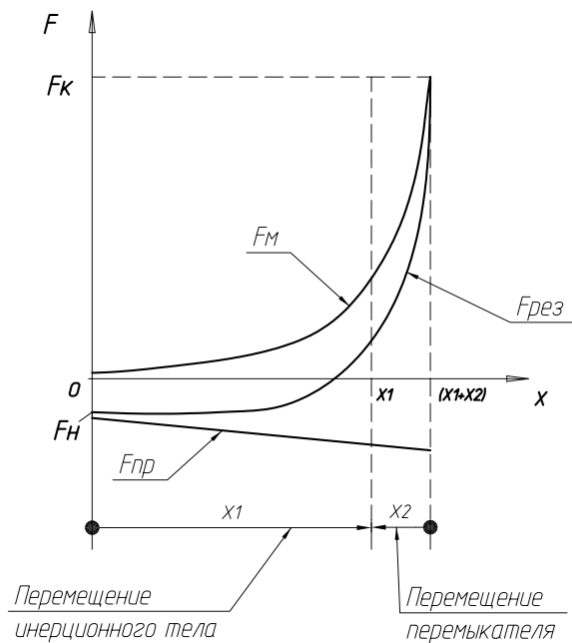


Рис. 3. Силовые характеристики магнитов и рабочей пружины при перемещении инерционного тела и переключателя

В герметичном цилиндрическом корпусе 1 (рис. 1–3), заполненном демпфирующей изоляционной жидкостью 2, размещены инерционное тело 3, поджатое пружиной 4, и контактная система 5. Демпфирующая жидкость 2 имеет рабочий диапазон температур, с запасом перекрывающий диапазон температур эксплуатации объекта применения. Инерционное тело 3 и переключатель 7 контактной системы 5 установлены соосно на цилиндрической направляющей 6, размещенной вдоль центральной оси корпуса 1. На обращенных друг к другу торцах инерционного тела 3 и переключателя 7 закреплены соответственно постоянные магниты 8, 9. Магниты 8, 9 закреплены разноименными полюсами друг к другу. Цилиндрическая пружина 4 размещена между инерционным телом 3 и переключателем 7. На цилиндрической направляющей 6 между инерционным телом 3 и переключателем 7 выполнен выступ 10, ограничивающий осевые перемещения навстречу друг к другу инерционного тела 3 и переключателя 7. Осевой ход x_1 инерционного тела 3 многократно превосходит осевой ход x_2 переключателя 7, который минимален, но достаточен для переключения контактной системы 5.

Инерционное тело 3 установлено на цилиндрической направляющей 6 на втулках 11, 12, выполненных из антифрикционного материала для снижения трения скольжения при движении инерционного тела 3 на цилиндрической направляющей 6.

Инерционное тело 3 и переключатель 7 установлены в исходных осевых положениях с зазорами b и e их противоположных торцов соответственно (рис. 1) с корпусными деталями (крышками 16, 23). Организованные таким образом зазоры исключают «залипание» инерционного тела 3 и переключателя 7 в начале их движения.

Между торцами постоянных магнитов 8, 9 при встречно перемещенном состоянии до упора в выступ 10 инерционного тела 3 и переключателя 7 организован гарантированный минимальный зазор (на чертежах не показан), исключающий касание торцов магнитов 8, 9, следовательно, предотвращающий их разрушение при значительных механических воздействиях. Инерционное тело 3 и переключатель 7 сопряжены по внешнему диаметру с внутренним диаметром корпуса 1 и по внутреннему диаметру с внешним диаметром цилиндрической направляющей 6 с малым, но гарантируемым в требуемом диапазоне температур эксплуатации инерционного включателя зазором, обеспечивающем подвижность инерционного тела и переключателя.

Контактная система 5 состоит из упругих U-образных контактов 13, закрепленных на токовых водах 14 двух уровней, размещенных на крышке 16 по окружности вокруг переключателя 7. Токовые воды 14 закреплены на крышке 16 через изоляторы 15. В изоляторе 18 переключателя 7 армированы V-образные токопроводящие ножи 17, взаимодействующие с упругими контактами 13 при переключении контактной системы 5. Контактная система 5 переключается перемещающимся по цилиндрической направляющей 6 переключателем 7. Конструкция контактной системы 5 с осевым перемещением переключателя 7 обеспечивает увеличенное число контактов со стабильными электрическими параметрами при ограниченном диаметре контактной системы, а следовательно, и прибора в целом. На рис. 2 показана конструкторская реализация в приборе 8 контактов. Соотношение замыкающих и замыкающих контактов может быть любым.

Сильфон 19 закреплен на крышке 23. Внутренний объем сильфона 19 через отверстия 22 соединен с внутренним объемом корпуса 1 и выполняет функцию компенсатора температурного изменения объема жидкости 2, заполняющей прибор. Возможные повреждения сильфона 19 предотвращает защитный кожух 20, закрепленный с торца корпуса 1.

Инерционный включатель работает следующим образом. При наличии ускорения a в направлении оси чувствительности с величиной, обеспечивающей превышение усилия предварительного поджатия пружины 4, инерционное тело 3 начинает перемещаться, сжимая пружину 4. Демпфирующая жидкость 2 перетекает через кольцевой зазор между корпусом 1 и фланцем инерционного тела 3, а также через зазоры между втулками 11, 12 и цилиндрической направляющей 6, отслеживая величиной расхода жидкости 2 через зазоры значение действующего линейного ускорения, т.е. интегрируется ускорение. Перемещение x_1 инерционного тела 3 ограничивается выступом 10. Возросшее усилие взаимного притяжения постоянных магнитов 8, 9 преодолевает усилие пружины 4 и силу инерции, действующую на переключатель 7, перемещает переключатель 7 в противоположную сторону на величину x_2 также до упора в выступ 10. При этом соответствующие токопроводящие ножи 17 переключателя 7 выходят из взаимодействия с упругими контактами 13 верхнего уровня и взаимодействуют с упругими контактами 13 нижнего уровня, формируя электрические цепи [4].

Характерные графики, поясняющие зависимость сил, действующих на инерционное тело 3 в осевом направлении при его перемещении из исходного положения в конечное, показаны на рис. 3, где $F_{пр}$ – сила пружины 4; F_m – сила взаимодействия постоянных магнитов 8, 9; $F_{рез}$ – результирующая (суммарная) сила пружины 4 и постоянных магнитов 8, 9, действующая на инерционное тело 3; F_n – результирующая сила в начале движения; F_k – результирующая сила в конце движения; X_1 – полный ход (осевое перемещение) инерционного тела 3 по оси x ; X_2 – полный ход (осевое перемещение) переключателя 7 в направлении, противоположном оси x .

Графики показывают, что результирующее (суммарное) силовое воздействие $F_{рез}$ пружины 4 и постоянных магнитов 8, 9 на инерционное тело 3 на большем участке его движения положительное (рис. 3), т.е. стремится вернуть инерционное тело 3 в исходное положение, а на конечном участке – отрицательное, т.е. способствует перемещению инерционного тела 3 в конечное осевое положение и удерживает его в этом положении.

При сближении постоянных магнитов 8, 9 из-за перемещения переключателя 7 к инерционному телу 3 на величину X_2 резко возросшее усилие взаимодействия магнитов 8, 9 обеспечивает сохранение переключенного состояния контактной системы 5.

Более подробное описание технических решений инерционного включателя приведено в патенте [3].

Математическая модель инерционного включателя

Введем прямоугольную правую систему координат $OXYZ$, связанную с инерционным включателем. Начало O системы координат – в центре начального положения поверхности постоянного магнита 8 инерционного тела. Направления осей показаны на рис. 1. Орты осей являются правой тройкой векторов [5].

Перемещение инерционного тела от начального положения по оси OX обозначим через $X_{ит}$ ($X1$ – максимальная координата $X_{ит}$). Перемещение переключателя от начального положения по оси OX обозначим через $X_{пер}$ ($X2$ – максимальная координата $X_{пер}$).

Для проведения анализа и расчетов элементов конструкции разработана 3D-модель инерционного включателя.

При составлении дифференциальных уравнений были приняты следующие допущения:

- жидкость считаем несжимаемой;
- изменения размеров деталей инерционного включателя за счет изменения температуры окружающей среды (от номинальной $T_{ж} = 20$ °C) не учитываются;
- изменение вязкости демпфирующей жидкости от изменения температуры окружающей среды (от нормальной $T_{ж} = 20$ °C) не учитывается.

Сила действует на подвижную часть инерционного включателя – инерционное тело с постоянным магнитом 8, втулками 11, 12 и переключатель с постоянным магнитом 9.

Сила инерции, действующая на инерционное тело $\vec{F}_{ин_ит}$, определяется следующим образом:

$$\vec{F}_{ин_ит} = -m_{пр_ит} \vec{a}_{ив_ит}, \quad (1)$$

где $m_{пр_ит}$ – приведенная масса инерционного тела; $\vec{a}_{ив_ит}$ – ускорение летательного аппарата в месте расположения инерционного тела инерционного включателя:

$$\vec{a}_{ив_ит} = (a_{ив_ит_x}; a_{ив_ит_y}; a_{ив_ит_z}); \quad (2)$$

$a_{ив_ит_x}, a_{ив_ит_y}, a_{ив_ит_z}$ – проекция $\vec{a}_{ив_ит}$ на оси системы координат $OXYZ$.

Выражение (1) с учетом соотношения (2) перепишем в следующем виде:

$$\vec{F}_{ин_ит} = -m_{пр_ит} (a_{ив_ит_x}; a_{ив_ит_y}; a_{ив_ит_z}). \quad (3)$$

Приведенная масса инерционного тела определяется по формуле

$$m_{пр_ит} = m_{ит} + m_{вт11} + m_{вт12} + m_{маг_ит} + \frac{m_{пр}}{3}, \quad (4)$$

где $m_{ит}$, $m_{вт11}$, $m_{вт12}$, $m_{маг_ит}$, $m_{пр}$ – масса инерционного тела, масса втулки 11, масса втулки 12, масса постоянного магнита 8, масса пружины 4 соответственно.

Аналогичным образом определяется сила инерции, действующая на переключатель $\vec{F}_{ин_пер}$:

$$\vec{F}_{ин_пер} = -m_{пр_пер} (a_{ив_пер_x}; a_{ив_пер_y}; a_{ив_пер_z}). \quad (5)$$

Приведенная масса переключателя определяется по формуле

$$m_{пр_пер} = m_{пер} + m_{маг_пер} + m_{пр}, \quad (6)$$

где $m_{пр_пер}$, $m_{маг_пер}$, $m_{пр}$ – масса переключателя 7, постоянного магнита 9 и пружины 4 соответственно; $\vec{a}_{ив_пер} = (a_{ив_пер_x}; a_{ив_пер_y}; a_{ив_пер_z})$ – ускорение летательного аппарата в месте расположения переключателя инерционного включателя; $a_{ив_пер_x}, a_{ив_пер_y}, a_{ив_пер_z}$ – проекции $\vec{a}_{ив_пер}$ на оси системы координат $OXYZ$.

Сила Архимеда, действующая на инерционное тело $\vec{F}_{A_ит}$, определяется следующим образом:

$$\vec{F}_{A_ит} = m_{пр_ж_ит} (\vec{a}_{ив_ит} - \vec{g}), \quad (7)$$

где g – ускорение свободного падения; $m_{пр_ж_ит}$ – приведенная масса жидкости, вытесненной инерционным телом:

$$m_{пр_ж_ит} = \rho_{ж} V_{пр_ит}, \quad (8)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкости (ГОСТ 13032-77),

$$V_{пр_ит} = V_{ит} + V_{вт11} + V_{вт12} + V_{маг_ит} + \frac{V_{пр}}{3}, \quad (9)$$

где $V_{ит}$, $V_{шт}$, $V_{вт11}$, $V_{вт12}$, $V_{маг_ит}$, $V_{пр}$ – объем инерционного тела, втулки 11, втулки 12, постоянного магнита 8, пружины 4 соответственно, определяются из 3D-модели инерционного включателя.

Сила Архимеда, действующая на переключатель $\vec{F}_{A_пер}$, определяется следующим образом:

$$\vec{F}_{A_пер} = m_{ж_пер} (\vec{a}_{ив_пер} - \vec{g}), \quad (10)$$

$m_{пр_ж_пер}$ – приведенная масса жидкости, вытесненной переключателем с постоянным магнитом 9 и пружиной 4:

$$m_{пр_ж_пер} = \rho_{ж} V_{пр_пер}, \quad (11)$$

$$V_{пр_ит} = V_{пер} + V_{маг_пер} + V_{пр}, \quad (12)$$

где $V_{пер}$, $V_{маг_пер}$, $V_{пр}$ – объем переключателя, постоянного магнита 9 и пружины 4 соответственно, определяются из 3D-модели инерционного включателя.

Величина силы упругости пружины 4 $F_{пр}$ (может менять свое направление по оси OX) определяется следующим образом:

$$F_{пр} = F_{пр_0} + C_{пр} (X_{пер} - X_{ит}), \quad (13)$$

где $F_{пр_0}$ – начальное усилие пружины; $C_{пр}$ – коэффициент упругости пружины (жесткость).

Сила $\vec{F}_{р_ит}$ действующая на втулки 11, 12 со стороны цилиндрической направляющей определяется следующим образом:

$$\vec{F}_{р_ит} = \vec{F}_{тр_ит} + \vec{N}_{11} + \vec{N}_{12}, \quad (14)$$

где $\vec{F}_{тр_ит}$ – сила трения втулок 11, 12 инерционного тела о цилиндрическую направляющую. Ее величина определяется следующим образом:

если $\frac{dX_{ит}}{dt} \neq 0$, то

$$F_{тр_ит} = \mu_{ит_с} (N_{11} + N_{12}); \quad (15)$$

если $\frac{dX_{ит}}{dt} = 0$, то

$$F_{тр_ит} \leq \mu_{ит_п} (N_{11} + N_{12}), \quad (16)$$

где $\mu_{ит_с}$, $\mu_{ит_п}$ – коэффициент трения скольжения и покоя соответственно; $\vec{N}_{11}$, $\vec{N}_{12}$ – нормальные составляющие реакций сил, действующих на цилиндрическую направляющую со стороны втулок 11, 12.

Сила $\vec{F}_{р_пер}$, действующая на переключатель со стороны цилиндрической направляющей, определяется следующим образом:

$$\vec{F}_{\text{р_пер}} = \vec{F}_{\text{тр_пер}} + \vec{N}_7, \quad (17)$$

где $\vec{F}_{\text{тр_пер}}$ – сила трения переключателя о цилиндрическую направляющую. Ее величина определяется следующим образом:

если $\frac{dX_{\text{ит}}}{dt} \neq 0$, то

$$F_{\text{тр_пер}} = \mu_{\text{пер_с}} N_7; \quad (18)$$

если $\frac{dX_{\text{ит}}}{dt} = 0$, то

$$F_{\text{тр_пер}} \leq \mu_{\text{пер_п}} N_7, \quad (19)$$

где $\mu_{\text{пер_с}}$, $\mu_{\text{пер_п}}$ – коэффициент трения скольжения и покоя соответственно; $\vec{N}_7$ – нормальная составляющая реакции силы, действующей на цилиндрическую направляющую со стороны переключателя.

Сила $\vec{F}_{\text{р_нож}}$, действующая на упругий контакт контактной системы переключателя со стороны токопроводящего ножа, определяется следующим образом:

$$\vec{F}_{\text{р_нож}} = (\vec{F}_{\text{тр_нож}} + \vec{N}_{17}), \quad (20)$$

где $\vec{F}_{\text{тр_нож}}$ – сила трения токопроводящего ножа об упругие контакты. Ее величина определяется следующим образом:

если $\frac{dX_{\text{ит}}}{dt} \neq 0$, то

$$F_{\text{тр_нож}} = \mu_{\text{нож_с}} N_{17}; \quad (21)$$

если $\frac{dX_{\text{ит}}}{dt} = 0$, то

$$F_{\text{тр_нож}} \leq \mu_{\text{нож_п}} N_{17}, \quad (22)$$

где $\mu_{\text{нож_с}}$, $\mu_{\text{нож_п}}$ – коэффициент трения скольжения и покоя соответственно; $\vec{N}_{17}$ – нормальная составляющая реакции силы, действующей на токопроводящие ножи со стороны упругих контактов.

Величину силы гидравлического сопротивления $F_{\text{гс_ит}}$ при протекании жидкости через кольцевой зазор между корпусом и фланцем инерционного тела, а также через зазоры между втулками 11, 12 инерционного тела и цилиндрической направляющей будем определять по следующей формуле:

$$F_{\text{гс_ит}} = \Delta p_{\text{ит}} S_{\text{ит}}, \quad (23)$$

где $\Delta p_{\text{ит}}$ – перепад давления жидкости на инерционном теле (перед и за телом); $S_{\text{ит}}$ – площадь торцевой поверхности инерционного тела (с фланцем):

$$S_{\text{ит}} = \frac{\pi d_{\text{ит}}^2}{4}, \quad (24)$$

$d_{\text{ит}}$ – внешний диаметр инерционного тела.

Перепад давления жидкости на инерционном теле будем определять из следующих соображений.

При перемещении инерционного тела с площадью поверхности $S_{\text{ит}}$ на величину $\Delta X_{\text{ит}}$ происходит вытеснение жидкости объемом $\Delta V_{\text{ит}}$:

$$\Delta V_{\text{ит}} = S_{\text{ит}} \Delta X_{\text{ит}}, \quad (25)$$

которая перетекает за промежуток времени Δt через кольцевой зазор между корпусом и фланцем инерционного тела, а также через зазоры между втулками 11, 12 инерционного тела и цилиндрической направляющей.

С другой стороны, имеем

$$\Delta V_{\text{ит}} = Q_{\text{ит}} \Delta t, \quad (26)$$

где $Q_{\text{ит}}$ – суммарный расход жидкости через зазоры.

Приравнявая соотношения (25) и (26), после ряда преобразований получаем следующее соотношение:

$$\frac{\Delta X_{\text{ит}}}{\Delta t} = \frac{Q_{\text{ит}}}{S_{\text{ит}}}. \quad (27)$$

После предельного перехода в выражении (27) при $\Delta t \rightarrow 0$ с учетом того, что

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta X_{\text{ит}}}{\Delta t} = |v_{\text{ит}}|, \quad (28)$$

имеем следующее соотношение для определения величины суммарного расхода жидкости:

$$Q_{\text{ит}} = |v_{\text{ит}}| S_{\text{ит}}, \quad (29)$$

где $v_{\text{ит}}$ – скорость движения инерционного тела.

С другой стороны, суммарный расход $Q_{\text{ит}}$ жидкости через зазоры можно определить следующим образом:

$$Q_{\text{ит}} = Q_{\text{к_ит}} + Q_{\text{вт_напр}}, \quad (30)$$

где $Q_{\text{к_ит}}$ – расход жидкости через кольцевой зазор между корпусом и фланцем инерционного тела, определяется по работе [6] как расход жидкости через кольцевую щель с учетом движения инерционного тела (поршня); $Q_{\text{вт_напр}}$ – расход жидкости через зазоры между втулками 11, 12 инерционного тела и цилиндрической направляющей, определяется по работе [6] как расход жидкости через кольцевую щель с учетом движения инерционного тела (поршня).

Величина силы гидравлического сопротивления $F_{\text{гс_пер}}$ при протекании жидкости через кольцевой зазор между корпусом и переключателем, а также через зазор между цилиндрической направляющей и переключателем будем определять по следующей формуле:

$$F_{\text{гс_пер}} = \Delta p_{\text{пер}} S_{\text{пер}}, \quad (31)$$

где $\Delta p_{\text{пер}}$ – перепад давления жидкости на переключателе (перед и за телом); $S_{\text{пер}}$ – площадь торцевой поверхности переключателя:

$$S_{\text{пер}} = \frac{\pi d_{\text{пер}}^2}{4}, \quad (32)$$

$d_{\text{пер}}$ – внешний диаметр переключателя.

Перепад давления жидкости на переключателе будем определять из следующих соображений.

При перемещении переключателя с площадью поверхности $S_{\text{пер}}$ на величину $\Delta X_{\text{пер}}$ происходит вытеснение жидкости объемом $\Delta V_{\text{пер}}$:

$$\Delta V_{\text{пер}} = S_{\text{пер}} \Delta X_{\text{пер}}, \quad (33)$$

которая перетекает за промежуток времени Δt через кольцевой зазор между корпусом и переключателем, а также через зазор между переключателем и цилиндрической направляющей.

С другой стороны, имеем

$$\Delta V_{\text{пер}} = Q_{\text{пер}} \Delta t, \quad (34)$$

где $Q_{\text{пер}}$ – суммарный расход жидкости через зазоры.

Приравнявая соотношения (33) и (34), после ряда преобразований получаем следующее соотношение:

$$\frac{\Delta X_{\text{пер}}}{\Delta t} = \frac{Q_{\text{пер}}}{S_{\text{пер}}}. \quad (35)$$

После предельного перехода в выражении (35) при $\Delta t \rightarrow 0$ с учетом того, что

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta X_{\text{пер}}}{\Delta t} = |v_{\text{пер}}|, \quad (36)$$

имеем следующее соотношение для определения величины суммарного расхода жидкости:

$$Q_{\text{ит}} = |v_{\text{пер}}| S_{\text{пер}}, \quad (37)$$

где $v_{\text{пер}}$ – скорость движения переключателя.

С другой стороны, суммарный расход $Q_{\text{пер}}$ жидкости через зазоры можно определить следующим образом:

$$Q_{\text{пер}} = Q_{\text{к_пер}} + Q_{\text{пер_напр}}, \quad (38)$$

где $Q_{\text{к_пер}}$ – расход жидкости через кольцевой зазор между корпусом и переключателем, определяется по работе [6] как расход жидкости через кольцевую щель с учетом движения переключателя (поршня); $Q_{\text{пер_напр}}$ – расход жидкости через зазор между переключателем и цилиндрической направляющей, определяется по работе [6] как расход жидкости через кольцевую щель с учетом движения инерционного тела (поршня).

Величина силы взаимодействия постоянных магнитов 8, 9 $F_{\text{маг}}$ определяется путем интерполяции по таблице ее значений, рассчитанных с использованием методов конечно-элементного анализа.

Уравнения движения инерционного тела и переключателя запишем в следующем виде:

$$\begin{cases} m_{\text{пр_ит}} \vec{a}_{\text{ит}} = \vec{F}_{\text{ин_ит}} + \vec{F}_{\text{А_ит}} + \vec{F}_{\text{пр}} + \vec{F}_{\text{р_ит}} + \vec{F}_{\text{гс_ит}} + \vec{F}_{\text{маг}}, \\ m_{\text{пр_пер}} \vec{a}_{\text{пер}} = \vec{F}_{\text{ин_пер}} + \vec{F}_{\text{А_пер}} + \vec{F}_{\text{пр}} + \vec{F}_{\text{р_пер}} + \vec{F}_{\text{р_нож}} + \vec{F}_{\text{гс_пер}} + \vec{F}_{\text{маг}}, \end{cases} \quad (39)$$

где $\vec{a}_{\text{ит}} = (a_{\text{ит}_x}; a_{\text{ит}_y}; a_{\text{ит}_z})$ и $\vec{a}_{\text{пер}} = (a_{\text{пер}_x}; a_{\text{пер}_y}; a_{\text{пер}_z})$ – ускорения инерционного тела и переключателя.

Система уравнений (39) решается численно при начальных условиях: $t = 0$ с, $X_{\text{ит}} = 0$ м, $X_{\text{пер}} = 0,014$ м, $Y_{\text{ит}} = 0$ м, $Y_{\text{пер}} = 0$ м, $Z_{\text{ит}} = 0$ м, $Z_{\text{пер}} = 0$ м.

Заключение

Представленные результаты работы показывают возможность создания надежного и технологичного инерционного включателя, предназначенного для технических систем автономных подвижных объектов.

Список литературы

1. Патент РФ 2778658, МПК Н 01 Н 35/14. Инерционный выключатель / Китаев В. Н. № 2022108834 ; заявл. 01.04.2022 ; зарег. 22.08.2022.
2. Китаев В. Н., Афанасьев Р. Л., Петров М. В. Математическая модель порогового инерционного включателя // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 30–40.
3. Патент РФ 2784377, МПК Н 01 Н 35/14. Инерционный включатель / Китаев В. Н. № 20221289621 ; заявл. 19.09.2022 ; зарег. 24.11.2022.
4. Китаев В. Н. Оптимальные пути решения конструкторских задач на примере создания надежного электро-механического поляризованного переключателя // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2015. Т. 2. С. 113–116.
5. Башта Т. М. Машиностроительная гидравлика : справ. пособие. М. : Машиностроение, 1971.
6. Китаев В. Н. Конструкция контактной системы электро-механического прибора // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2015. Т. 2. С. 110–111.

References

1. Patent RF 2778658, MPK N 01 N 35/14. Inertial switch. Kitaev V.N. № 2022108834; appl. 01.04.2022; reg. 22.08.2022. (In Russ.)
2. Kitaev V.N., Afanas'ev R.L., Petrov M.V. Mathematical model of a threshold inertial switch. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(1):30–40. (In Russ.)

3. Patent RF 2784377, MPK N 01 N 35/14. Inertial switch. Kitaev V.N. № 20221289621; appl. 19.09.2022; reg. 24.11.2022. (In Russ.)
4. Kitaev V.N. Optimal ways to solve design problems by the example of creating a reliable electromechanical polarized switch. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2015;2:113–116. (In Russ.)
5. Bashta T.M. *Mashinostroitel'naya gidravlika: sprav. posobie = Machine-building hydraulics : reference manual*. Moscow: Mashinostroenie, 1971. (In Russ.)
6. Kitaev V.N. Design of the contact system of an electromechanical device. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2015;2:110–111. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Николаевич Китаев

начальник конструкторского отдела,
Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский
институт технической физики
имени академика Е. И. Забабахина
(Россия, Челябинская обл.,
г. Снежинск, ул. Васильева, 13)
E-mail: kb2@vniitf.ru

Роман Львович Афанасьев

кандидат технических наук,
заместитель начальника отдела,
Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский
институт технической физики
имени академика Е. И. Забабахина
(Россия, Челябинская обл.,
г. Снежинск, ул. Васильева, 13)
E-mail: kb2@vniitf.ru

Максим Владимирович Петров

инженер,
Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский
институт технической физики
имени академика Е. И. Забабахина
(Россия, Челябинская обл.,
г. Снежинск, ул. Васильева, 13)
E-mail: kb2@vniitf.ru

Vladimir N. Kitaev

Head of the design department,
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin
All-Russian Research Institute of Technical Physics
(13 Vassilyev street, Snezhinsk,
Chelyabinsk region, Russia)

Roman L. Afanasiev

Candidate of technical sciences,
deputy head of department,
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin
All-Russian Research Institute of Technical Physics
(13 Vassilyev street, Snezhinsk,
Chelyabinsk region, Russia)

Maxim V. Petrov

Engineer,
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin
All-Russian Research Institute of Technical Physics
(13 Vassilyev street, Snezhinsk,
Chelyabinsk region, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 15.12.2023

Поступила после рецензирования / Revised 25.12.2023

Принята к публикации / Accepted 20.01.2024

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПОЛЯРИЗОВАННЫЙ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЬ С БЕЗДРЕБЕЗГОВОЙ КОНТАКТНОЙ СИСТЕМОЙ

В. Н. Китаев¹, Д. И. Сафонов², Е. В. Бабушкина³, Р. В. Спрогис⁴, И. В. Родионов⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е. И. Забабахина, Снежинск, Челябинская обл., Россия

¹ kb2@uniitf.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Электромагнитные поляризованные переключатели используются в технических объектах для коммутации электрических цепей их систем. Промышленностью выпускается значительная номенклатура подобных коммутирующих устройств, однако не все они могут быть применены в вышеуказанных объектах, в которых обычно имеются ограничения по массе и размерам используемых приборов и систем. Также зачастую от коммутирующих приборов требуется работа в высокоточных электрических цепях с предъявлением требований по исключению дребезга замкнутых контактов при ударных и вибрационных воздействиях. Срабатывание подобных приборов происходит при подаче напряжения на обмотки управления. Представлены результаты разработки электромагнитного поляризованного переключателя, обеспечивающего его применение в слабо и высокоточных электрических цепях систем подвижных и стационарных технических объектов. *Материалы и методы.* В электромагнитном поляризованном переключателе использованы «врубные» дублированные контакты с двухсторонним многоточечным контактированием, обеспечивающие коммутацию и пропускание как малых, так и больших токов со стабильными электрическими параметрами в течение длительных сроков эксплуатации и исключающие дребезг замкнутых контактов при ударных и вибрационных воздействиях. Разработанный электромагнитный переключатель обеспечивает: значительный момент удержания поворотного якоря при отсутствии электропитания, обеспечивающий сохранение исходного и переключенного состояний контактной системы; движущий момент, создаваемый поворотным якорем, достаточный для надежного переключения контактной системы; увеличенный угол поворота якоря, позволяющий применение надежных «врубных» контактов, обеспечивающих стабильные электрические параметры в течение длительного срока эксплуатации, в том числе и при индуктивной нагрузке; ограниченное энергопотребление; автоматическое отключение подачи напряжения на управляющие обмотки при переключении состояний. *Результаты и выводы.* Из результатов представленных в работе расчетов следует, что при и после воздействия на переключатель одиночного механического удара полусинусоидальной формы с требуемыми параметрами в продольном направлении взаимодействие в каждой паре «контактная пружина – нож переключателя», отвечающей за сохранение контактного перехода, в каждый момент времени носит «скользящий» или «склеенный» характер, т.е. дребезг контактов отсутствует. Отсутствие дребезга контактов при ударных и вибрационных воздействиях также подтверждено по результатам испытаний переключателя.

Ключевые слова: электромагнитный поляризованный переключатель, магнитная система, контактная система, бездребезговые контакты, надежность

Для цитирования: Китаев В. Н., Сафонов Д. И., Бабушкина Е. В., Спрогис Р. В., Родионов И. В. Электромагнитный поляризованный переключатель с бездребезговой контактной системой // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 98–107. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-11

ELECTROMAGNETIC POLARIZED SWITCH WITH BOUNCE-FREE CONTACT SYSTEM

V.N. Kitaev¹, D.I. Safonov², E.V. Babushkina³, R.V. Sprogis⁴, I.V. Rodionov⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Chelyabinsk region, Russia

¹ kb2@uniitf.ru

Abstract. *Background.* Electromagnetic polarized switches are used in land-based vehicles to commute the electric circuits in a system. There is a wide variety of industrially available commutating devices, but few of them are applicable for the above purpose due to weight and size limitations. Moreover, the commutating devices are often

operated in high-current circuits, requiring retaining of both initial and tailored states of high probability, and reliability under hard impacts and vibrations as well. The above devices are triggered by applying voltage to winding controls. The work provides a design of the electromagnetic polarized switch, suitable for application in both low- and high-current electric circuits of different engineering systems: aircrafts, mobile and stationary facilities. The electromagnetic polarized switch relies upon gained backup contacts of two-sided multipoint contacting to make possible commutation and cutoff of both low and high currents with stable electrical parameters during the long operation life, eliminating closed contacts chatter under significant shock and vibration effects. *Materials and methods.* Designed electromagnetic switch provides: sizeable moment of retention of the turning armature in the absence of power, that keeps initial and switched state of the contact system; driving moment, produced by the turning armature, suffices for reliable switching of the contact system; augmented angle of the armature turning, that enables use of reliable gained contacts to sustain stable electric parameters for a long operational life, including one under inductive load; power-saving consumption; automatic switch-off power on the control windings when switching state. *Results and conclusions.* It follows from the resulting calculations of work that during and after the effect of single longwise half-sinusoidal mechanical impact of designed parameters on the switch, the interaction in every couple «spring contact – bridge cutter», retaining the contact transition, is of «gliding» or «glued» type, that excludes contacts chatter. Absence of contacts chatter under impacts and vibration loads is also proved by tests.

Keywords: electromagnetic polarized switch, magnetic system, contact system, bounce-free contacts, reliability

For citation: Kitaev V.N., Safonov D.I., Babushkina E.V., Sprogis R.V., Rodionov I.V. Electromagnetic polarized switch with bounce-free contact system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1): 98–107. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-11

Необходимость разработки

В системах автоматики технических объектов для коммутации электрических цепей требуется использование электромагнитных поляризованных реле и переключателей. Промышленностью выпускается значительная номенклатура подобных коммутирующих устройств, однако не все они могут быть применены в вышеуказанных объектах, в которых обычно имеются ограничения по массе и размерам используемых приборов и систем. Также зачастую от коммутирующих приборов требуется работа в сильноточных электрических цепях.

В настоящей статье показана возможность создания малогабаритного электромагнитного поляризованного переключателя, обеспечивающего его применение в слабо- и сильноточных электрических цепях. Переключатель может быть создан при обеспечении его конструкцией:

- требуемого момента удержания поворотного якоря;
- требуемого движущего момента, создаваемого поворотным якорем;
- требуемого угла поворота якоря;
- ограниченного энергопотребления.

Проведенный патентно-технический поиск не позволил выявить известные технические варианты электромагнитных поляризованных переключателей и реле, позволяющие решить поставленные задачи технического задания. Для обеспечения предъявленных техническим заданием к объекту разработки требований следует создать новые технические решения как составных частей, так и всего объекта.

Были разработаны и защищены патентами РФ конструкции электромагнитных поляризованных переключателей [1–4], а также конструкция малогабаритной вибро- и ударостойкой контактной системы, обеспечивающей коммутацию слаботочных и сильноточных электрических цепей [5]. Пути решения конструкторских задач при создании электромеханического поляризованного переключателя представлены в ранее опубликованных статьях [6–7]. В ходе выполнения разработки были выбраны технические решения переключателя [3, 4] для использования в КД. По результатам испытаний лабораторных образцов для дальнейшей разработки принята конструкция с окончательным техническим решением [3].

Конструкция

Конструкция разработанного электромагнитного поляризованного переключателя иллюстрируется рис. 1–4.

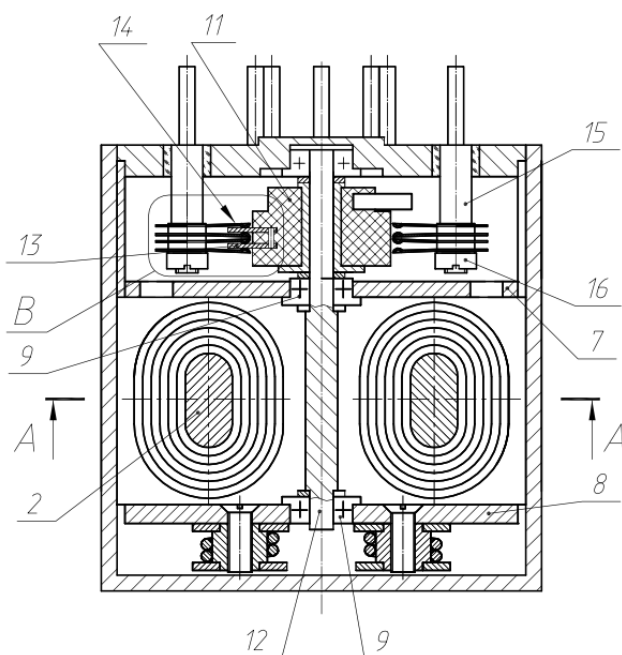


Рис. 1. Продольный разрез

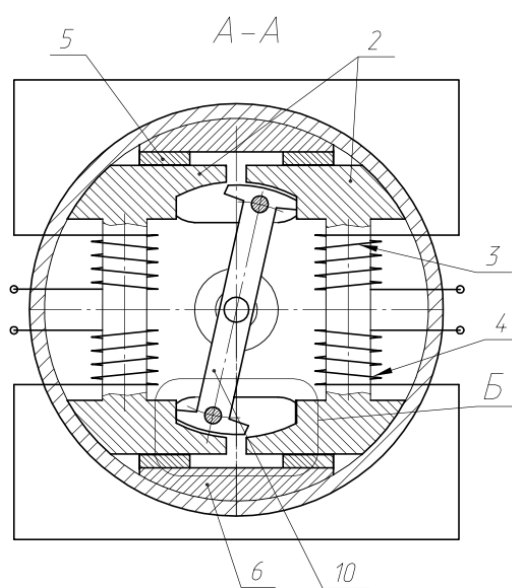


Рис. 2. Конструкция магнитной системы

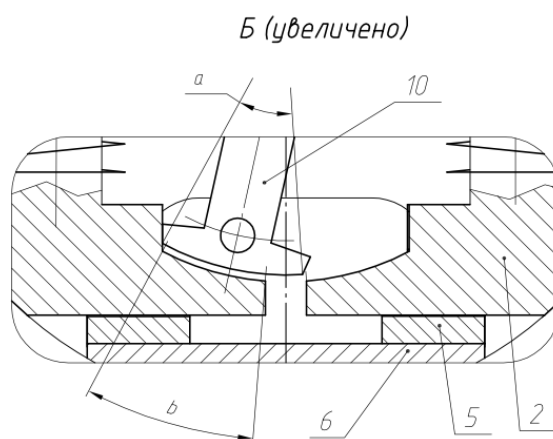


Рис. 3. Взаимодействие якоря с полюсами магнитопроводов

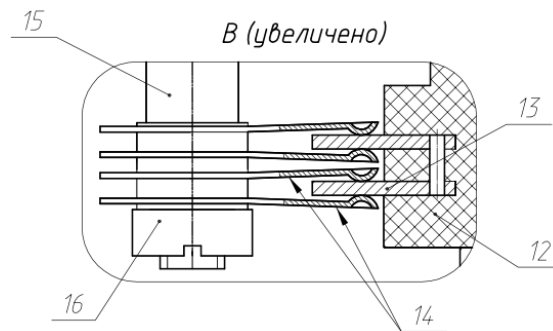


Рис. 4. Конструкция спаренных контактов

Электромагнитный поляризованный переключатель содержит кожух 1 из немагнитного металла, изолирующий внутренний объем переключателя. В кожухе 1 установлены взаимодействующие магнитная и контактная системы. Магнитная система состоит из двух симметрично расположенных магнитопроводов 2, на которых выполнено по две обмотки – рабочая 3 и отбойная 4. Магнитопроводы 2 выполнены из магнитомягкого сплава с высокой индукцией насыщения. Части рабочей 3 и отбойной 4 обмоток, размещенные на разных магнитопроводах 2, соединены попарно последовательно, при этом конец части обмотки на первом магнитопроводе 2 соединен с концом части обмотки на втором. На каждом торце магнитопроводов 2 закреплены постоянные высококоэрцитивные редкоземельные магниты 5, намагниченные вдоль короткой стороны и соединенные с внешней стороны с дополнительными магнитопроводами 6, обеспечивающими замкнутую магнитную цепь. Дополнительные магнитопроводы 6 выполнены из магнитомягкого сплава с высокой индукцией насыщения.

К магнитопроводам 2 прикреплены платы 7 и 8, в центральных отверстиях которых на подшипниках 9 установлен симметричный якорь 10. Платы 7 и 8 выполнены из немагнитного металла, а якорь 10 – из магнитомягкого сплава с высокой индукцией насыщения.

Контактная система состоит из переключателя 11, закрепленного на оси 12 якоря 10, с токопроводящими ножами 13, которые переключают пары «врубных» контактов 14, закрепленных на токовыводах 15 гайками 16.

Работа электромагнитного поляризованного переключателя

При отсутствии напряжения на рабочей 3 и отбойной 4 обмотках якорь 10 притянут к полюсам магнитопроводов 2, обеспечивая исходное или сработавшее состояние электромагнитного поляризованного переключателя.

При подаче напряжения на последовательно соединенные части рабочей обмотки 3, в последних реализуются магнитные потоки, вызывающие подавление магнитных потоков соответствующих удерживающих постоянных магнитов 5 и усиление магнитных потоков других, симметрично расположенных относительно первых, постоянных магнитов 5 и, как следствие, – поворот против хода часовой стрелки (рис. 2) якоря 10 к противоположным полюсам магнитопроводов 2, в результате которого переключатель 11 переключает «врубные» контакты 14. При снятии напряжения с рабочей обмотки 3 электромагнитный поляризованный переключатель сохраняет свое переключенное состояние.

Аналогично при подаче напряжения на последовательно соединенные части отбойной обмотки 4 в последних реализуются магнитные потоки, вызывающие подавление магнитных потоков соответствующих удерживающих постоянных магнитов 5 и усиление магнитных потоков других, симметрично расположенных относительно первых, постоянных магнитов 5 и, как следствие, – поворот уже по ходу часовой стрелки якоря 10 к противоположным полюсам магнитопроводов 2, в результате которого переключатель 12 переключает «врубные» контакты 14 в исходное состояние. При снятии напряжения с отбойной обмотки 4 электромагнитный поляризованный переключатель также сохраняет это состояние.

В электромагнитном поляризованном переключателе поворотный якорь 10 взаимодействует с полюсами магнитопроводов 2 по значительной площади через цилиндрический зазор и дополнительно (в основном на конечных углах поворота) через угловой зазор, при этом внешняя цилиндрическая поверхность якоря 10 выполнена с угловой шириной a , превышающей угловую ширину внутренней цилиндрической поверхности магнитопроводов 2 (рис. 3).

Установка на токовыводах 15 дополнительной пары встречно поджатых упругих контактов 14, имеющих разные (не кратные основным упругим контактам) собственные частоты, позволяет уменьшить вероятность кратковременных размыканий (дребезга) замкнутых контактов при значительных ударных и вибрационных воздействиях (рис. 3).

В электромагнитном поляризованном переключателе использованы «врубные» дублированные контакты с двухсторонним многоточечным контактированием, обеспечивающие коммутацию и пропускание как малых, так и больших токов со стабильными электрическими параметрами в течение длительных сроков эксплуатации и исключающие дребезг замкнутых контактов при значительных ударных и вибрационных воздействиях.

Подробнее с конструкцией электромагнитного переключателя можно ознакомиться по описанию патента на его техническое решение [3].

Оценка дребезга контактов переключателя при действии ударной нагрузки

Исключение дребезга замкнутых контактов переключателя достигается их конструкцией. На каждом токовыводе расположена контактная группа, состоящая из двух пар контактных пружин, разделенных между собой прокладкой. Между пружинами, входящими в состав одной пары, расположен упор. Внешний вид токовывода с контактной группой в незатянутом состоянии показан на рис. 5.

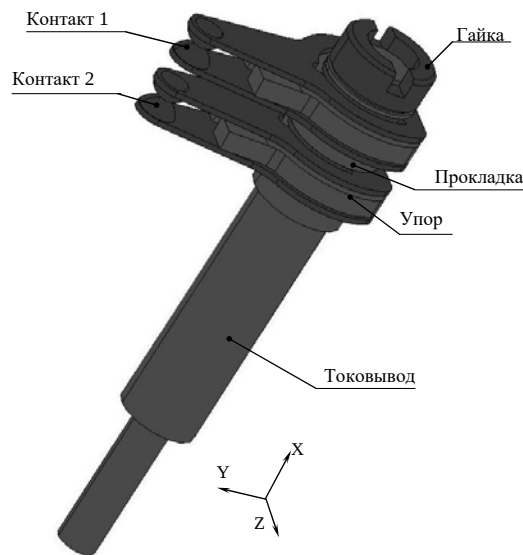


Рис. 5. Токовывод с контактной группой

Упругие контакты 1, 2 выполнены из материала с высокими упругими характеристиками и электропроводностью и отличаются между собой формой выреза. Вид пружин показан на рис. 6.



Рис. 6. Внешний вид контактов

Расчет собственных частот упругих контактов проведен численным конечно-элементным методом.

Первая собственная частота контакта 1 составляет 2032 Гц, соответствующая ей форма колебаний приведена на рис. 7.

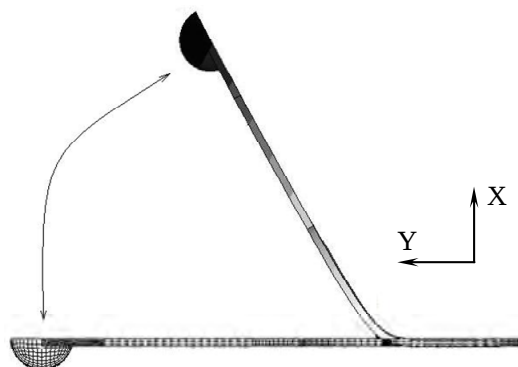


Рис. 7. Первая форма колебаний контакта 1

Первая собственная частота контакта 2 составляет 2654 Гц, соответствующая ей форма колебаний аналогична форме колебаний контакта 1.

Расчет напряженно-деформированного состояния контактной группы проведен численным конечно-элементным методом с учетом затяжки гайки и взаимодействия пружин с ножами переключателя.

Амплитудно-временные зависимости ускорений, реализующихся на местах крепления токовыводов в плате и ножей в переключателе, для случая воздействия на прибор одиночного механического удара, полусинусоидальной формы с амплитудой ускорения $A_x = 1000$ условных единиц и длительностью $\tau = 1$ условная временная единица в наиболее критичном для переключателя продольном направлении (X), показаны на рис. 8 и являются исходными данными для расчета напряженно-деформированного состояния контактной группы и оценки дребезга контактов.

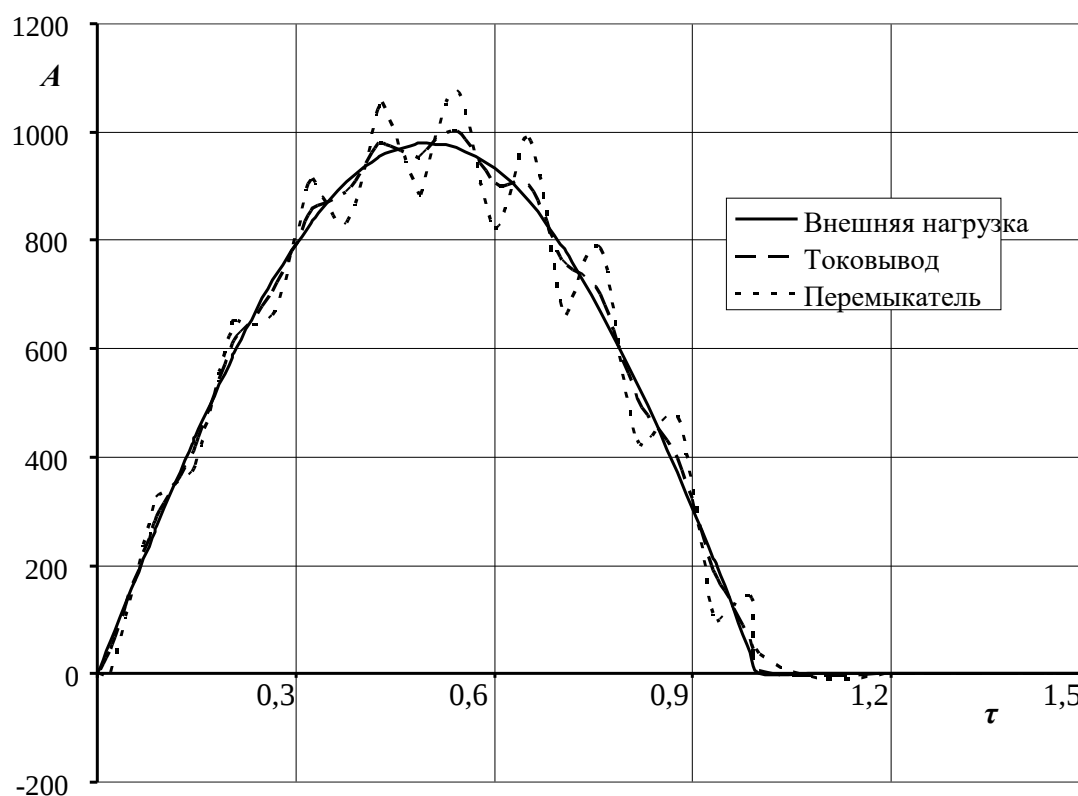


Рис. 8. Амплитудно-временные зависимости ускорений

Из результатов расчетов следует, что при и после воздействия на переключатель указанного механического удара максимальные эквивалентные напряжения в контактной группе реализуются в контакте 2 и находится на уровне предела текучести материала. Дальнейшее увеличение нагрузки может привести к возникновению необратимых пластических деформаций и потере пружиной необходимых для ее работоспособности упругих свойств. Общий вид контактов с учетом затяжки и взаимодействия с ножом переключателя и распределение эквивалентных напряжений показаны на рис. 9 (упор не показан).

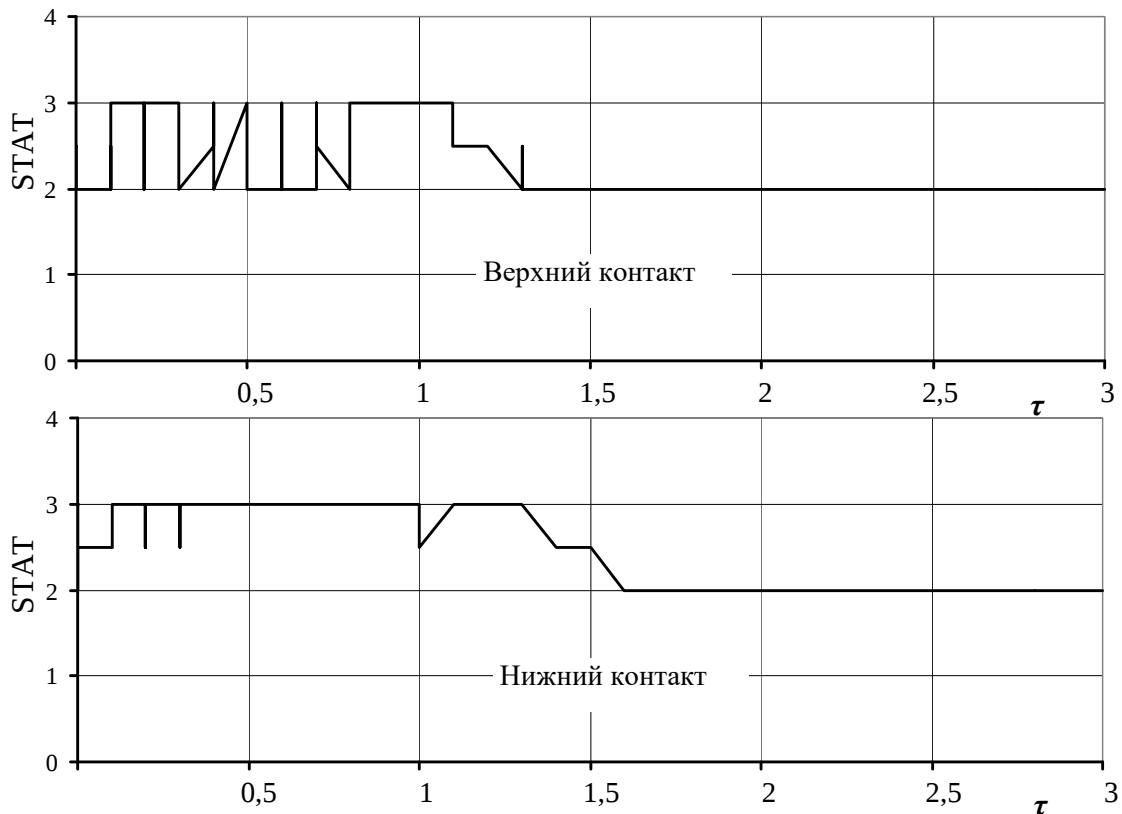


Рис. 9. Характер взаимодействия между контактами 2 и ножом переключателя

Распределение эквивалентных напряжений в пружине 1 носит аналогичный характер, максимальное значение также не превышает предела текучести материала.

Для оценки дребезга контактов используется следующая система контроля взаимодействия контактирующих поверхностей (статус контакта в паре «контактная пружина – нож переключателя» – STAT), реализованная в используемом для расчетов программном пакете:

$0 \leq \text{STAT} < 1$ – взаимодействие между контактирующими поверхностями отсутствует, поверхности находятся на значимом расстоянии друг от друга;

$1 \leq \text{STAT} < 2$ – взаимодействие между контактирующими поверхностями отсутствует, но поверхности находятся вблизи друг от друга;

$2 \leq \text{STAT} < 3$ – взаимодействие между контактирующими поверхностями носит «скользящий» характер (по касательной);

$3 \leq \text{STAT}$ – взаимодействие между контактирующими поверхностями носит «склеенный» характер.

Процесс изменения во времени статуса взаимодействия между контактирующими поверхностями показан на рис. 10, 11.

Из результатов расчетов следует, что при и после воздействия на переключатель одиночного механического удара полусинусоидальной формы с амплитудой ускорения $A_x = 1000$ условных единиц и длительностью $\tau = 1$ условная временная единица в продольном направлении (X) взаимодействие в каждой паре «контактная пружина – нож переключателя» в каждый момент времени носит «скользящий» или «склеенный» характер, т.е. дребезг контактов отсутствует.

Отсутствие дребезга контактов при ударных воздействиях также подтверждено по результатам испытаний переключателя.

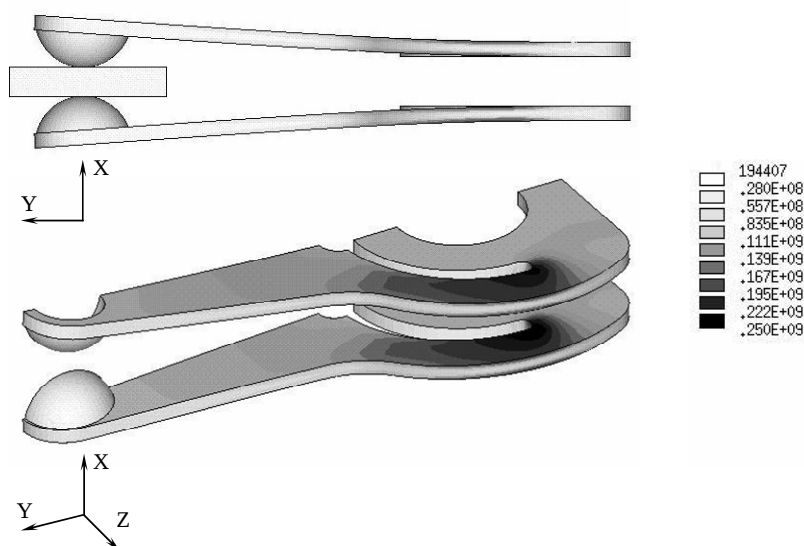


Рис. 10. Распределение эквивалентных напряжений в контакте 2, Па

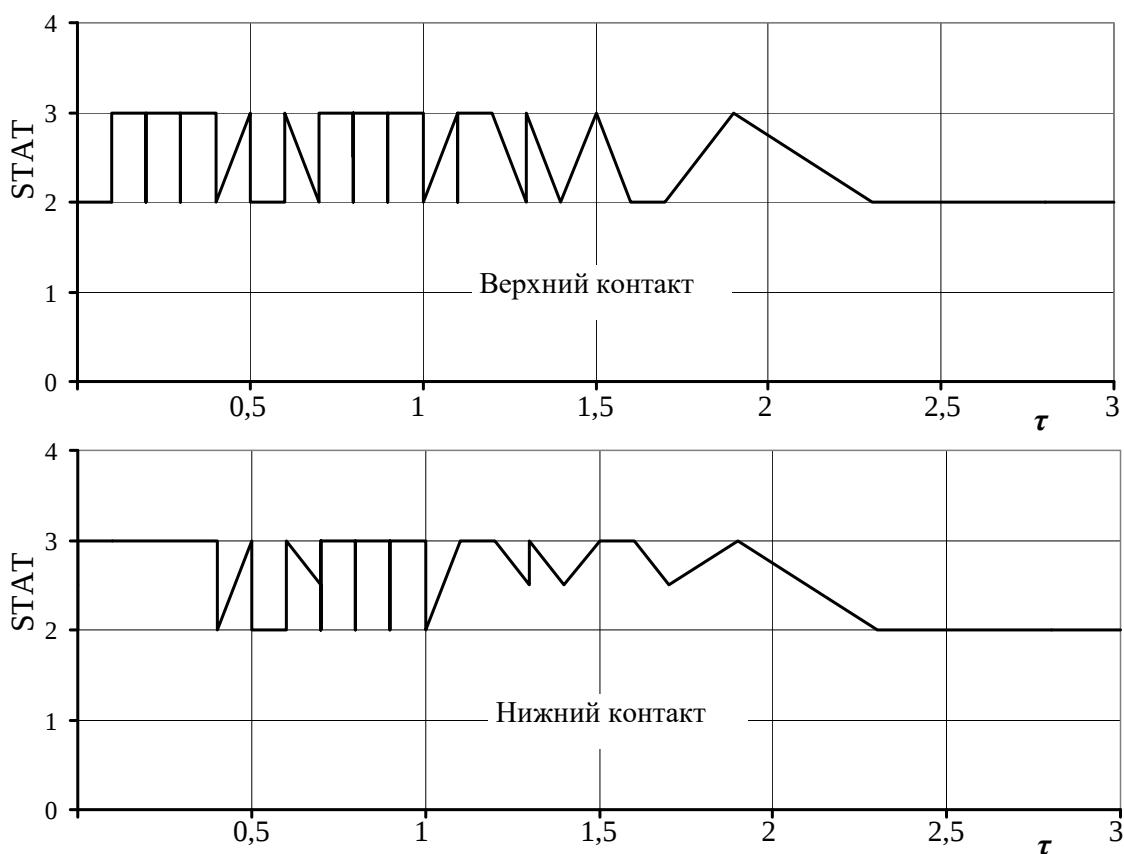


Рис. 11. Характер взаимодействия между контактами 1 и ножом переключателя

Список литературы

1. Патент РФ 2529642, Н01Н 51/00. Электромагнитный поляризованный переключатель / Китаев В. Н., Сафонов Д. И., Бабушкина Е. В. № 2013103124/07 ; заявл. 23.01.2013 ; опубл. 27.09.2014.
2. Патент РФ 2552524, Н01Н 51/22. Электромагнитный поляризованный переключатель / Китаев В. Н., Сафонов Д. И., Бабушкина Е. В. № 2013131673/07 ; заявл. 09.07.2013 ; опубл. 10.06.2015.
3. Патент РФ 2599625, Н01Н 51/22. Электромагнитный поляризованный переключатель / Китаев В. Н., Сафонов Д. И., Бабушкина Е. В. № 2015124070/07 ; заявл. 19.06.2015 ; опубл. 10.10.2016.
4. Патент РФ 2604205, Н01Н 51/00. Электромагнитный поляризованный переключатель / Китаев В. Н., Сафонов Д. И., Бабушкина Е. В. № 2015143496/07 ; заявл. 12.10.2015 ; опубл. 10.12.2016.

5. Патент РФ 2552349, H01H1/42. Контактная система / Китаев В. Н., Китаева Е. Н., Новоселова Н. В. № 2013112091/07 ; заявл. 18.03.2013 ; опубл. 10.06.2015.
6. Китаев В. Н. Оптимальные пути решения конструкторских задач на примере создания надежного электро-механического поляризованного переключателя // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2015. Т. 2. С. 113–116.
7. Китаев В. Н. Конструкция контактной системы электромеханического // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2015. Т. 2. С. 110–111.

References

1. Patent RF 2529642, H01H 51/00. Electromagnetic polarized switch. Kitaev V.N., Safonov D.I., Babushkina E.V.; appl. 23.01.2013; publ. 27.09.2014. (In Russ.)
2. Patent RF 2552524, H01H 51/22. Electromagnetic polarized switch. Kitaev V.N., Safonov D.I., Babushkina E.V.; appl. 09.07.2013; publ. 10.06.2015. (In Russ.)
3. Patent RF 2599625, H01H 51/22. Electromagnetic polarized switch. Kitaev V.N., Safonov D.I., Babushkina E.V.; appl. 19.06.2015; publ. 10.10.2016. (In Russ.)
4. Patent RF 2604205, H01H 51/00. Electromagnetic polarized switch. Kitaev V.N., Safonov D.I., Babushkina E.V.; appl. 12.10.2015; publ. 10.12.2016. (In Russ.)
5. Patent RF 2552349, H01H1/42. Contact system. Kitaev V.N., Kitaeva E.N., Novoselova N.V.; appl. 18.03.2013; publ. 10.06.2015. (In Russ.)
6. Kitaev V.N. Optimal ways to solve design problems by the example of creating a reliable electromechanical polarized switch. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2015;2:113–116. (In Russ.)
7. Kitaev V.N. Design of the electromechanical contact system. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2015;2:110–111. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Николаевич Китаев

начальник конструкторского отдела,
Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский
институт технической физики
имени академика Е. И. Забабахина
(Россия, Челябинская обл.,
г. Снежинск, ул. Васильева, 13)
E-mail: kb2@vniitf.ru

Дмитрий Игоревич Сафонов

инженер,
Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский
институт технической физики
имени академика Е. И. Забабахина
(Россия, Челябинская обл.,
г. Снежинск, ул. Васильева, 13)
E-mail: kb2@vniitf.ru

Елена Викторовна Бабушкина

инженер,
Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский
институт технической физики
имени академика Е. И. Забабахина
(Россия, Челябинская обл.,
г. Снежинск, ул. Васильева, 13)
E-mail: kb2@vniitf.ru

Vladimir N. Kitaev

Head of the design department,
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin
All-Russian Research Institute of Technical Physics
(13 Vassilyev street, Snezhinsk,
Chelyabinsk region, Russia)

Dmitry I. Safonov

Engineer,
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin
All-Russian Research Institute of Technical Physics
(13 Vassilyev street, Snezhinsk,
Chelyabinsk region, Russia)

Elena V. Babushkina

Engineer,
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin
All-Russian Research Institute of Technical Physics
(13 Vassilyev street, Snezhinsk,
Chelyabinsk region, Russia)

Роман Валерьевич Спрогис

инженер,
Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский
институт технической физики
имени академика Е. И. Забабахина
(Россия, Челябинская обл.,
г. Снежинск, ул. Васильева, 13)
E-mail: kb2@vniitf.ru

Иван Вячеславович Родионов

инженер,
Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский
институт технической физики
имени академика Е. И. Забабахина
(Россия, Челябинская обл.,
г. Снежинск, ул. Васильева, 13)
E-mail: kb2@vniitf.ru

Roman V. Sprogis

Engineer,
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin
All-Russian Research Institute of Technical Physics
(13 Vassilyev street, Snezhinsk,
Chelyabinsk region, Russia)

Ivan V. Rodionov

Engineer,
Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin
All-Russian Research Institute of Technical Physics
(13 Vassilyev street, Snezhinsk,
Chelyabinsk region, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 15.12.2023

Поступила после рецензирования/Revised 25.12.2023

Принята к публикации/Accepted 20.01.2024

КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДЛЯ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА КАЧЕСТВА НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ

Т. И. Мурашкина¹, Е. А. Бадеева², В. А. Бадеев³

^{1, 2, 3} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹timurashkina@mail.ru, ²badeeva_elena@mail.ru, ³vladbadeev4464@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* От качества нефтепродуктов зависят технические характеристики и работоспособность оборудования. Анализ состава нефтепродукта проводят, как правило, в лабораторных условиях с помощью оптических способов диагностики. Из оптических способов наибольшее распространение получили рефрактометрические способы определения состава нефти по коэффициентам преломления, которое изменяется при изменении химического состава. Основной недостаток известных методов анализа – это большое время проведения измерений, связанный с необходимостью отбора пробы из трубопровода. Для экспресс-анализа состава веществ запатентованы рефрактометрический способ и волоконно-оптический датчик (ВОД) для его реализации. Объектом исследования являются процессы экспресс-анализа качества нефти и нефтепродуктов. Предметом исследования являются научно-технические решения рефрактометрических волоконно-оптических датчиков качества нефтепродуктов. Целью работы является разработка конструктивно-технологического решения повышенной надежности для экспресс-анализа качества нефти и нефтепродуктов не только в лабораторных, но в сложных эксплуатационных условиях. *Материалы и методы.* Авторы предлагают проводить экспресс-анализ состава нефтепродуктов непосредственно на участке трубопровода, по которому протекает жидкость, по аналогии с датчиками давления, которые устанавливаются непосредственно на трубу. Для этого к трубке пробозаборного устройства предлагается присоединить ВОД качества жидкости. Основным подходом для достижения поставленной цели является адаптация известных технических решений ВОД путем модернизации микро-оптико-механической системы (МОМС). Для повышения надежности ВОД и систем на их основе предложено исключить механические информативные и неинформативные изгибы волоконно-оптического кабеля, что возможно на пути применения микро-оптико-механической системы, в которых оптические волокна не деформируются. *Результаты.* Разработано конструктивно-технологическое решение ВОД качества нефтепродуктов повышенной надежности на базе разработанного двухканального волоконно-оптического преобразователя с цилиндрической поллой трубкой с жидкостью, коэффициент преломления которой определяется. *Выводы.* Разработанное конструктивно-технологическое решение ВОД, который осуществляет мгновенное измерение показателя преломления жидкости в трубопроводе, позволит повысить надежность пробоборной системы нефтепроводов, снизить необоснованные затраты процесса пробоборы, повысить точность измерения показателей качества жидкого прозрачного для видимого и ИК-излучения нефтепродукта. Разработанный ВОД можно использовать для экспресс-мониторинга не только в системах пробоборы нефтетрубопроводов, но и для диагностики загрязнения водной составляющей окружающей среды, а также для определения типа жидкости практически во всех отраслях народного хозяйства.

Ключевые слова: конструктивно-технологическое решение, волоконно-оптический датчик, экспресс-анализ, качество, рефрактометрический способ, показатель преломления, трубка, нефть и нефтепродукты

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-10017.

Для цитирования: Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А., Бадеев В. А. Конструктивно-технологическое решение волоконно-оптического датчика для экспресс-анализа качества нефти и нефтепродуктов // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 108–115. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-12

CONSTRUCTIVE AND TECHNOLOGICAL SOLUTION FIBER OPTIC SENSOR FOR EXPRESS ANALYSIS OF THE QUALITY OF OIL AND PETROLEUM PRODUCTS

T.I. Murashkina¹, E.A. Badeeva², V.A. Badeev³

^{1, 2, 3} Penza State University, Penza, Russia

¹timurashkina@mail.ru, ²badeeva_elena@mail.ru, ³vladbadeev4464@gmail.com

Abstract. *Background.* The technical characteristics and operability of the equipment depend on the quality of petroleum products. The analysis of the composition of petroleum products is carried out, as a rule, in laboratory conditions using optical diagnostic methods. Of the optical methods, the most widely used are refractometric methods for determining the composition of oil by refractive coefficients, which changes when the chemical composition changes. The main disadvantage of the known methods of analysis is the long measurement time associated with the need to take a sample from the pipeline. For the express analysis of the composition of substances, a refractometric method and a fiber-optic sensor (FOS) for its implementation have been patented. The object of the study is the processes of express analysis of the quality of oil and petroleum products. The subject of the research is scientific and technical solutions of refractometric fiber-optic sensors of the quality of petroleum products. The aim of the work is to develop a design and technological solution of a fiber-optic sensor of increased reliability for express analysis of the quality of oil and petroleum products not only in the laboratory, but in difficult operating conditions. *Materials and methods.* The authors propose to conduct an express analysis of the composition of petroleum products directly on the section of the pipeline through which the liquid flows, by analogy with pressure sensors that are installed directly on the pipe. To do this, it is proposed to attach a liquid FOS to the tube of the sampling device. The main approach to achieve this goal is the adaptation of well-known technical solutions of water by upgrading the micro-optical-mechanical system (MOMS). In order to increase the reliability of waters and systems based on them, it is proposed to exclude mechanical informative and uninformative bends of fiber-optic cable, which is possible in the way of using MOMS, in which optical fibers are not deformed. *Results.* A constructive and technological solution has been developed to improve the quality of petroleum products of increased reliability on the basis of a developed two-channel fiber-optic converter with a cylindrical hollow tube with a liquid, the refractive index of which is determined by. *Conclusions.* The developed design and technological solution of the VOD, which performs instantaneous measurement of the refractive index of the liquid in the pipeline, will increase the reliability of the sampling system of oil pipelines, reduce unreasonable costs of the sampling process, increase the accuracy of measuring the quality indicators of liquid transparent to visible and IR radiation of petroleum products. The developed water can be used for express monitoring not only in oil pipeline sampling systems, but also for diagnosing pollution of the water component of the environment, as well as for determining the type of liquid in almost all sectors of the national economy.

Keywords: structural and technological solution, fiber-optic sensor, express analysis, quality, refractometric method, refractive index, tube, oil and petroleum products

Financing: the research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation № 23-29-10017.

For citation: Murashkina T.I., Badeeva E.A., Badeev V.A. Constructive and technological solution fiber optic sensor for express analysis of the quality of oil and petroleum products. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):108–115. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-12

Введение

На базе нефтепродуктов работает практически вся современная техника. От качества этих продуктов зависят технические характеристики и работоспособность оборудования. Поэтому к качеству нефти и нефтепродуктов (дизельного топлива, бензина, керосина и пр.) выдвигаются высокие требования. Выделяются следующие основные показатели качества нефти: состав сред, плотность и вязкость вещества. Например, если вязкость нефтепродукта низкая, то повышается вероятность выхода из строя подвижных частей оборудования, если, наоборот, вязкость высокая, то топливо и масла нельзя использовать при пониженных температурах [1].

Основные физические и химические процессы, приводящие к изменению качества нефти, следующие: испарение, загрязнение водой и механическими примесями, отслоение, смешение разных сортов нефтей, разложение, конденсация, коррозия и т.д. [2].

В современной практике контроля качества проводится оперативный экспресс-анализ, который проводится в том числе по упрощенным методикам [2]. Если выявлены какие-либо отклонения от нормы тогда проводится тщательная лабораторная проверка вещества.

Широко применяется поточный метод определения качества нефти и нефтепродуктов в процессе их транспортирования по трубопроводам с помощью пробоотборников [2]. Пробу нефти или нефтепродукта из трубопровода отбирают стационарным пробоотборником. Пробозаборные трубки монтируют на корпусе диспергатора [ГОСТ 2517-2012. Нефть и нефтепродукты. Методы отбора проб]. Пробу из трубопровода отбирают в процессе перекачивания при скорости жидкости на входе в пробозаборное устройство, равной средней линейной скорости жидкости в трубопроводе. Если поток жидкости в трубопроводе однородный (содержание воды, солей и механических примесей одинаково по поперечному сечению), то пробозаборное устройство устанавливают внутри трубопровода на вертикальном или горизонтальном участках трубопровода после насоса или перемешивающего

устройства. Загнутый конец трубки пробозаборного устройства располагают по оси трубопровода навстречу потоку (рис. 1).

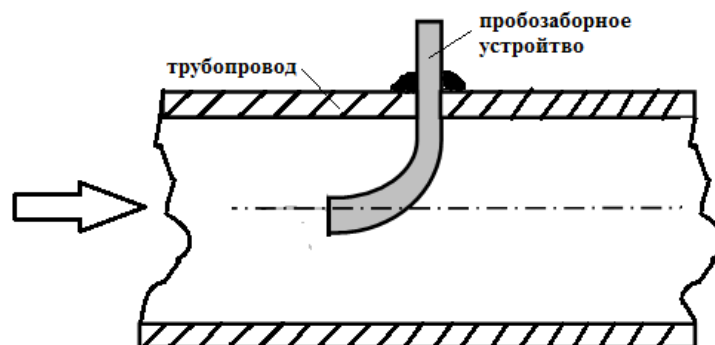


Рис. 1. Схема расположения пробозаборного устройства в виде одной трубки [ГОСТ 2517-2012]

Анализ состава нефтепродукта, размещенного в нефtezаборнике, проводят, как правило, в лабораторных условиях с помощью оптических способов диагностики. Из оптических способов наибольшее распространение получили рефрактометрические способы определения состава нефти по коэффициентам преломления, которое изменяется при изменении химического состава [3].

Известен ряд рефрактометрических способов определения коэффициента преломления жидкости, общим недостатком которых является большое время измерения параметров, характеризующих качество нефтепродуктов [4–6].

В лабораторных условиях определение коэффициента преломления нефти проводится с помощью рефрактометра. Наиболее распространенным прибором этого типа, дающим достаточно точные результаты, является рефрактометр ИРФ-454Б2М [7]. Но, несмотря на то, что определение коэффициента преломления с помощью этого рефрактометра – быстрая операция, следует иметь в виду, что из тонкой пленки нефти или нефтепродукта, нанесенных на призму рефрактометра, очень быстро улетучиваются наиболее легкие предельные углеводороды, и коэффициент преломления при этом заметно увеличивается. Поэтому исследователи стараются как можно быстрее нанести каплю нефти на стекло и сразу закрыть измерительную головку прибора. Кроме того, из-за нерезкой границы освещенного и неосвещенного полей в окуляре точность определения коэффициента низкая.

Самый главный недостаток – это большое время проведения измерений, связанное с необходимостью отбора пробы из трубопровода.

В работе [8] были предложены рефрактометрический способ экспресс-анализа состава прозрачных для видимого и инфракрасного оптического излучения веществ и упрощенное конструктивное решение волоконно-оптического устройства для его реализации. Стоит задача адаптации этого технического решения для определения качества нефти и нефтепродуктов.

Таким образом, целью работы является разработка конструктивно-технологического решения волоконно-оптического датчика (ВОД) повышенной надежности для экспресс-анализа качества нефти и нефтепродуктов не только в лабораторных, но в сложных эксплуатационных условиях.

Методы и подходы

Авторы предлагают проводить экспресс-анализ состава нефтепродуктов непосредственно на участке трубопровода, по которому протекает жидкость, по аналогии с датчиками давления, которые устанавливаются непосредственно на трубу. Для этого к трубке пробозаборного устройства предлагается присоединить ВОД качества жидкости.

Основным подходом для достижения поставленной цели является адаптация известных технических решений ВОД [9] путем модернизации оптико-механической системы (МОМС) ВОД. На основании анализа механической надежности известных ВОД [10] сделан вывод: для повышения надежности ВОД и систем на их основе в сложных условиях эксплуатации необходимо исключить механические информативные и неинформативные изгибы волоконно-оптического кабеля, что возможно на пути применения МОМС, в которых оптические волокна не деформируются [9]. На основании такого вывода происходил выбор принципа действия ВОД качества нефти и нефтепродуктов. Были исключены технические решения на основе береговых решеток и рассматривались

волоконно-оптические измерительные преобразователи (ВОП), в которых модуляция оптического сигнала может осуществляться с помощью различных оптико-модулирующих элементов [9].

Результаты

На рис. 2 приведена конструкция ВОД качества нефтепродуктов на базе разработанного двух-канального волоконно-оптического преобразователя с цилиндрической полый трубкой с жидкостью, коэффициент преломления которой определяется в работах [11–13].

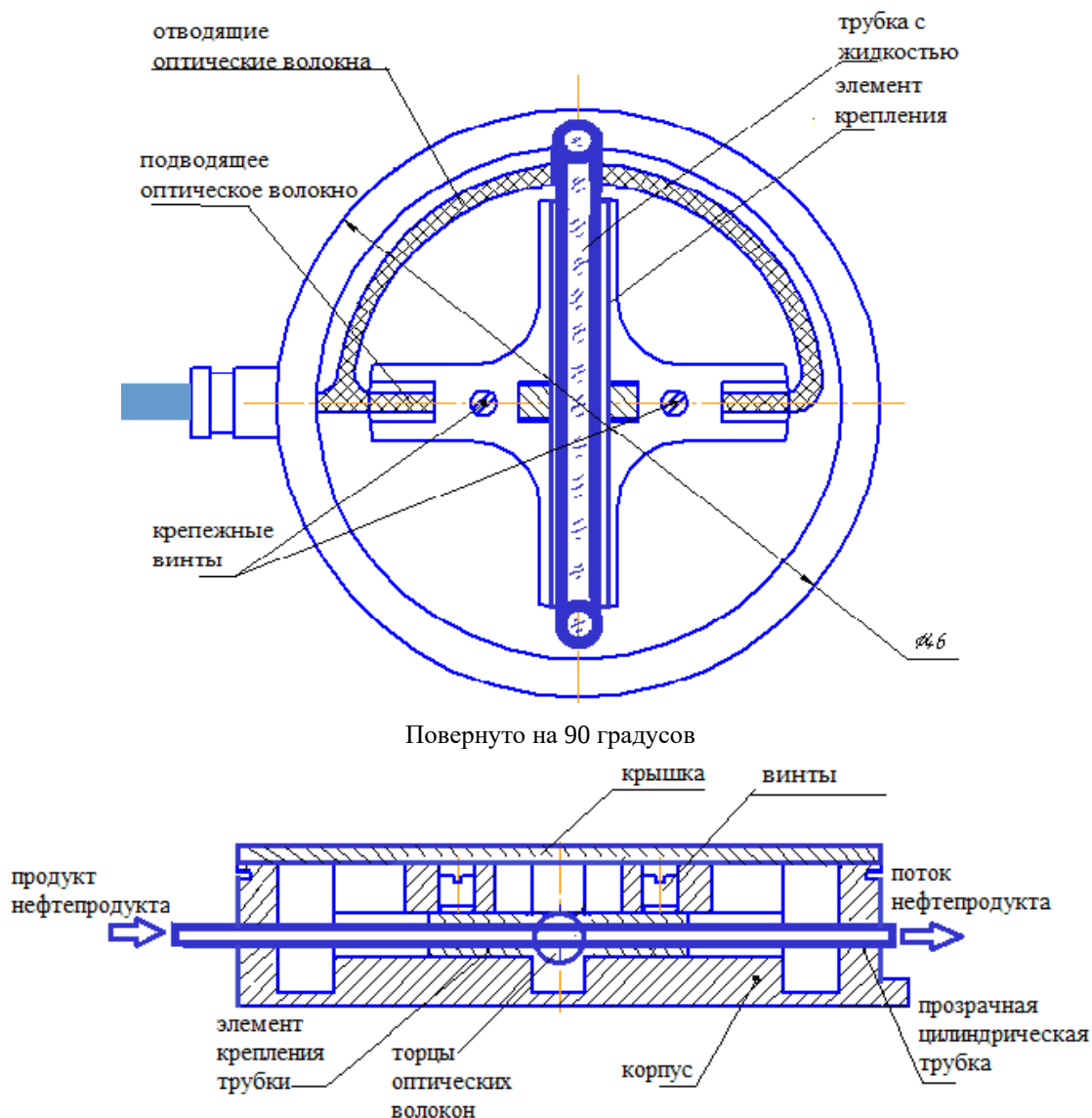


Рис. 2. Рефрактометрический волоконно-оптический датчик качества нефтепродукта

В цилиндрическом корпусе размещен ВОП, состоящий из цилиндрической трубки, закрепленной в корпусе с помощью крестообразного элемента крепления, а также одного подводящего оптического волокна (ПОВ) и двух отводящих оптических волокон (ООВ) (по одному на каждый из двух измерительных каналов).

Для того, чтобы оптические волокна не сломались в процессе сборки и эксплуатации датчика, они укладываются в специальную выемку в основании корпуса и заливаются герметиком. При этом радиус изгиба оптических волокон не меньше десяти внешних диаметров волокна [14]. Так, для применяемых «кварц-кварцевых» оптических волокон типа ZLWF200/240/270НТ//360, внешний диаметр которых 0,36 мм, принят минимальный радиус 3,6 мм, а для большей надежности конструкции он увеличен до 5 мм. В месте максимального изгиба для большей надежности оптические волокна помещены во фторопластовые трубки.

Для установки расстояний и определения пространственного расположения торцов, концы подводящих и отводящих оптических волокон крепятся с помощью эпоксидного клея во втулки, которые фиксируются установочными винтами. Одновременно винты фиксируют элемент крепления трубки с жидкостью. Расстояния от ПОВ до трубки и от трубки до ООВ выбираются из условия наиболее эффективного ввода оптического излучения в волоконный микро-оптический канал [9].

Втулка с подводящим оптическим волокном – прозрачная цилиндрическая трубка, втулка с отводящими оптическими волокнами расположены на одной оптической оси. В конструкции важно обеспечить абсолютную соосность этих элементов. Отклонение от соосности порядка 10 мкм может привести к полной неработоспособности датчика. Поэтому в элементе крепления отверстия для крепления втулок изготавливаются сверлением с помощью одного сверла с одного захода [15]. В процессе юстировки соосность трубки с жидкостью относительно втулок с оптическими волокнами обеспечивается перемещением трубки по оси z с помощью кольцевых прокладок (на рисунке не показаны) переменной толщины, располагаемых сверху и снизу трубки в месте крепления крестообразного элемента крепления. Прокладки имеют толщину от 0,01 до 0,1 мм. Толщина прокладок подбирается в процессе юстировки оптической системы датчика.

Так как разрабатываемый ВОД работает в широком температурном диапазоне, характерном для нефтяной промышленности, то основные корпусные элементы выполнены из стали 12Х18Н10Т.

Полость датчика должна быть герметичной, поэтому все внешние конструктивные элементы датчика соединяются с помощью сварки (в частности, корпус и крышка датчика). Но перед сваркой для предотвращения образования конденсата на оптических элементах ВОП (поверхность трубки, торцы подводящих и отводящих оптических волокон) при перепадах температур в период эксплуатации датчика в полость датчика закачивается аргон, коэффициент преломления которого 1,000067 и который близок к коэффициенту преломления воздуха (1,000293), при котором происходит настройка датчика. Ввиду того, что датчик используется для определения коэффициента преломления во втором или третьем знаке после запятой, аргон не повлияет на метрологические характеристики датчика после его окончательной сборки.

В соответствии с ГОСТ 2517-2012 при неоднородном потоке жидкости пробозаборное устройство имеет разное количество пробозаборных трубок с загнутыми концами, направленными навстречу потоку:

- одна трубка – при диаметре трубопровода до 100 мм;
- три трубки – при диаметре трубопровода от 100 до 400 мм;
- пять трубок – при диаметре с трубопровода выше 400 мм.

Поэтому в систему пробоотвода необходимо ставить соответствующее количество датчиков.

ВОП предлагаемого датчика выполнено двухканальным [11]. Это сделано с целью:

- увеличения чувствительности преобразования за счет суммирования нескольких световых потоков (соответственно количеству отводящих оптических волокон);
- снижения дополнительных погрешностей, обусловленных:
 - изменением мощности источника излучения, чувствительности приемников излучения при изменении температуры окружающей среды;
 - неинформативными изгибами оптического кабеля под воздействием внешних дестабилизирующих факторов.

Обсуждения

Предлагаемое конструктивно-технологическое решение датчика позволяет:

- упростить процедуру юстировки волоконной микро-оптической системы ВОП;
- уменьшить массо-габаритные характеристики ВОП и датчика в целом;
- проводить экспресс-мониторинг качественных параметров нефтепродуктов;
- исключить электромагнитное воздействие на результаты измерения;
- повысить точность измерения показателя преломления.

ВОД, реализующие рефрактометрический способ измерения показателя преломления нефтепродуктов, описанный в работе [9], можно использовать для экспресс-мониторинга не только в системах пробоотбора нефтетрубопроводов, но и для диагностики загрязнения водной составляющей окружающей среды, а также для определения типа жидкости практически во всех отраслях народного хозяйства.

Заключение

Разработанное конструктивно-технологическое решение ВОД, который осуществляет мгновенное измерение показателя преломления жидкости в трубопроводе, позволит повысить надежность пробоотборной системы нефтепроводов, снизить необоснованные затраты процесса пробоотбора, повысить точность измерения показателей качества жидкого прозрачного для видимого и ИК-излучения нефтепродукта.

Список литературы

1. Замалаев С. Н., Мызников Д. С. Косвенное определение характеристик взвешенных в дизельном топливе частиц через скорость его транспортирования по трубопроводу // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. 2023. Т. 13, № 3. С. 232–235.
2. Ханов Н. И., Фатхутдинов А. Ш. Измерение количества и качества нефти и нефтепродуктов при сборе, транспортировке, переработке и коммерческом учете. СПб. : Из-во СПбУЭФ, 2010. 270 с.
3. Evdokimov I. N., Eliseev N. Yu., Akhmetov B. R. Initial stages of asphaltene aggregation in dilute crude oil solutions: studies of viscosity and NMR relaxation // Fuel. 2002. Vol 82, № 7. P. 817–823.
4. Волкова Г. В. Световодный рефрактометрический датчик контроля химического состава жидких сред : дис. ... канд. техн. наук. М., 2004. 145 с.
5. Латышенко К. П. Мониторинг загрязнения окружающей среды : учебник и практикум для среднего профессионального образования. М. : Изд-во Юрайт, 2019. 375 с.
6. Патент РФ 2292038, МПК G 01N 21/41. Способ измерения показателя преломления и устройство для его реализации / Волков Р. И., Федоров Э. И. № 2005106125/28 ; заявл. 03.09.2005, опубл. 20.01.2007.
7. Акмаров К. А., Артемьев В. В., Белов Н. П. [и др.]. Промышленные рефрактометры и их применение для контроля химических производств // Приборы. 2012. № 4 (142). С. 1–8.
8. Патент РФ 2796797. Волоконно-оптический способ определения коэффициента преломления прозрачного вещества и реализующий его волоконно-оптический рефрактометрический измерительный преобразователь / Бадеева Е. А., Бадеев В. А., Мурашкина Т. И., Серебряков Д. И., Хасаншина Н. А., Васильев Ю. А., Кукушкин А. Н. № 2021130405А ; заявл. 18.10.2021 ; опубл. 29.05.2023, Бюл. № 14.
9. Мурашкина Т. И., Бадеева Е. А. Волоконно-оптические приборы и системы: научные разработки НТЦ «Нанотехнологии волоконно-оптических систем Пензенского государственного университета». СПб. : Политехника, 2018. Ч. 1. 187 с.
10. Бадеева Е. А., Бадеев В. А., Славкин И. Е. [и др.]. Повышение надежности ВОД давления, эксплуатируемых в условиях космических факторов // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии : сб. тр. XV Междунар. науч.-практ. конф. / под. ред. С. У. Увайсова. М. : Ассоциация выпускников и сотрудников ВВИА им. проф. Жуковского, 2019. Вып. 1. С. 256–259.
11. Бадеева Е. А., Мурашкина Т. И., Полякова Е. А. [и др.]. Реализация принципа двухканальности в волоконно-оптических информационно-измерительных системах // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2021. № 2 (58). С. 87–98.
12. Бадеев В. А., Мурашкина Т. И. Микрорефрактометрический измерительный преобразователь для определения качества жидкостных сред // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2023. Т. 1. С. 474–476.
13. Бадеев В. А., Шачнева Л. А., Шапетько Е. А., Мурашкина Т. И. Применение волоконно-оптических рефлексометрических микросенсоров при мониторинге состояния водной среды // Материалы, средства и технологии получения и обработки измерительной информации (Шляндинские чтения-2022) : материалы XIV Междунар. науч.-техн. конф. Пенза : Изд-во ПГУ, 2022. С. 106–108.
14. Вейнберг В. Б., Сатаров Д. К. Оптика световодов. Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1977. 320 с.
15. Ишков А. С., Солодимова Г. А., Кучковская Н. А. Управление надежностью и качеством датчиков как изделий ответственного назначения // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. Т. 2. С. 18–25.

References

1. Zamalaev S.N., Myznikov D.S. Indirect determination of the characteristics of particles suspended in diesel fuel through the speed of its transportation through a pipeline. *Nauka i tekhnologii truboprovodnogo transporta nefi i nefteproduktov* = . 2023;13(3):232–235. (In Russ.)
2. Khanov N.I., Fatkhutdinov A.Sh. *Izmerenie kolichestva i kachestva nefi i nefteproduktov pri sbore, transportirovke, pererabotke i kommercheskom uchete* = *Measurement of quantity and quality oil and petroleum products in the collection, transportation, processing and commercial accounting*. Saint Petersburg: Iz-vo SRbUEF, 2010:270. (In Russ.)

3. Evdokimov I.N., Eliseev N.Yu., Akhmetov B.R. Initial stages of asphaltene aggregation in dilute crude oil solutions: studies of viscosity and NMR relaxation. *Fuel*. 2002;82(7):817–823.
4. Volkova G.V. Light-guide refractometric sensor for monitoring the chemical composition of liquid media. PhD dissertation. Moscow, 2004:145. (In Russ.)
5. Latyshenko K.P. *Monitoring zagryazneniya okruzhayushchey sredy: uchebnik i praktikum dlya srednego professional'nogo obrazovaniya = Environmental pollution monitoring : textbook and workshop for secondary vocational education*. Moscow: Izd-vo Yurayt, 2019:375. (In Russ.)
6. Patent RF 2292038, MPK G 01N 21/41. A method for measuring the refractive index and a device for its implementation. R.I. Volkov, E.I. Fedorov. № 2005106125/28; appl. 03.09.2005, publ. 20.01.2007. (In Russ.)
7. Akmarov K.A., Artem'ev V.V., Belov N.P. et al. Industrial refractometers and their application for the control of chemical industries. *Pribory = Devices*. 2012;(4):1–8. (In Russ.)
8. Patent RF 2796797. Fiber-optic method for determining the refractive index of a transparent substance and a fiber-optic refractometric measuring transducer implementing it. Badeeva E.A., Badeev V.A., Murashkina T.I., Serebryakov D.I., Khasanshina N.A., Vasil'ev Yu.A., Kukushkin A.N. № 2021130405A; appl. 18.10.2021; publ. 29.05.2023, Bull. № 14. (In Russ.)
9. Murashkina T.I., Badeeva E.A. *Volokonno-opticheskie pribory i sistemy: nauchnye razrabotki NTTs «Nanotekhnologii volokonno-opticheskikh sistem Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta» = Fiber-optic devices and systems: scientific developments of the Scientific Research Center "Nanotechnology of fiber-optic systems of Penza State University"*. Saint Petersburg: Politehnika, 2018;(part 1):187. (In Russ.)
10. Badeeva E.A., Badeev A.V., Slavkin I.E. et al. Improving the reliability of pressure waters operated under conditions of space factors. *Innovatsionnye, informatsionnye i kommunikatsionnye tekhnologii: sb. tr. XV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Innovative, information and communication technologies : collection of tr. XV International scientific and practical conference*. Moscow: Assotsiatsiya vypusknikov i sotrudnikov VVIA im. prof. Zhukovskogo, 2019;(1):256–259. (In Russ.)
11. Badeeva E.A., Murashkina T.I., Polyakova E.A. et al. Implementation of the principle of two-channel operation in fiber-optic information and measurement systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of higher educational institutions. The Volga region. Technical sciences*. 2021;(2):87–98. (In Russ.)
12. Badeev V.A., Murashkina T.I. A microrefractometric measuring transducer for determining the quality of liquid media. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2023;1:474–476. (In Russ.)
13. Badeev V.A., Shachneva L.A., Shapet'ko E.A., Murashkina T.I. The use of fiber-optic reflexometric microsensors in monitoring the state of the aquatic environment. *Materialy, sredstva i tekhnologii polucheniya i obrabotki izmeritel'noy informatsii (Shlyandinskie chteniya-2022): materialy XIV Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. = Materials, means and technologies for obtaining and processing measuring information (Shlyandinsky readings-2022) : materials of the XIV International scientific and technical conf*. Penza: Izd-vo PGU, 2022:106–108. (In Russ.)
14. Veynberg V.B., Satarov D.K. *Optika svetovodov = Optics of light guides*. Leningrad: Mashinostroenie, Leningr. otd-nie, 1977:320. (In Russ.)
15. Ishkov A.S., Solodimova G.A., Kuchkovskaya N.A. Reliability and quality management of sensors as products of responsible purpose. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2018;2:18–25. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Татьяна Ивановна Мурашкина

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры приборостроения,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: timurashkina.pgu@mail.ru

Tatyana I. Murashkina

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of instrument making,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Елена Александровна Бадеева

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры
радиотехники и радиоэлектронных систем,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: badeeva_elena@mail.ru

Elena A. Badeeva

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department
of radio engineering and radio electronic systems,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Владислав Александрович Бадеев

студент,

Пензенский государственный университет

(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: vladbadeev4464@gmail.com

Vladislav A. Badeev

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 10.12.2023

Поступила после рецензирования/Revised 18.01.2023

Принята к публикации/Accepted 10.02.2024

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

УДК 616.12-073.97-71:004.89
doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-13

НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДУЛЬ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЗАРЕГИСТРИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ СИСТЕМ АМБУЛАТОРНОГО ПЕРСОНАЛЬНОГО ТЕЛЕМОНИТОРИНГА ЭКГ

А. Ю. Кривоногов¹, М. С. Геращенко², С. И. Геращенко³, А. Н. Митрошин⁴, С. Ф. Левин⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ leonidkrivonogov@yandex.ru, ² cts.com@yandex.ru, ³ mpo@list.ru, ⁴ an-mitroshin@mail.ru, ⁵ lvin.stanislav.01@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается разработка системы амбулаторного персонального телемониторинга ЭКГ (АПТЭКГ). Показана связь повышения достоверности принимаемых решений в системах АПТЭКГ с контролем качества зарегистрированных электрокардиосигналов (ЭКС). Доказана целесообразность включения в состав систем АПТЭКГ модуля контроля качества зарегистрированных ЭКС. *Материалы и методы.* Разработана структурная схема системы АПТЭКГ с модулем контроля качества зарегистрированных ЭКС в ее составе. Определены его функции и связи с другими модулями. Модуль контроля качества зарегистрированных ЭКС реализован как нейросетевой бинарный классификатор на основе 2D CNN. Для представления ЭКС в виде изображения использовалось вейвлет-преобразование. Создана база изображений для обучения и тестирования нейросетей. *Результаты и выводы.* На языке программирования Python разработаны четыре нейронные сети глубокого обучения, по результатам тестирования которых наилучший результат показала сеть VGGNet19 с точностью 0,97, логарифмической потерей 0,1 и F-мерой 0,97. Разработанная структурная схема системы АПТЭКГ и модуль контроля качества зарегистрированных ЭКС позволят повысить достоверность принимаемых диагностических решений.

Ключевые слова: качество электрокардиосигнала, искусственные нейронные сети, глубокое обучение, системы амбулаторного персонального телемониторинга ЭКГ

Для цитирования: Кривоногов Л. Ю., Геращенко М. С., Геращенко С. И., Митрошин А. Н., Левин С. Ф. Нейросетевой модуль контроля качества зарегистрированных сигналов для систем амбулаторного персонального телемониторинга ЭКГ. 2024. № 1. С. 116–123. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-13

NEURAL NETWORK MODULE FOR QUALITY CONTROL OF REGISTERED SIGNALS FOR AMBULATORY PERSONAL TELEMONITORING ECG SYSTEMS

L.Yu. Krivonogov¹, M.S. Gerashchenko², S.I. Gerashchenko³, A.N. Mitroshin⁴, S.F. Levin⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Penza State University, Penza, Russia

¹ leonidkrivonogov@yandex.ru, ² cts.com@yandex.ru, ³ mpo@list.ru, ⁴ an-mitroshin@mail.ru, ⁵ lvin.stanislav.01@mail.ru

Abstract. *Background.* The article is devoted to the development of an ambulatory personal telemonitoring ECG systems (APTECG systems). The relationship of increasing the reliability of decisions made in APTECG systems with

quality control of recorded ECGs is shown. The expediency of including the quality control module of registered ECGs in the APTECG systems is proved. *Materials and methods.* A block diagram of the APTECG system with a quality control module of registered ECGs in its composition has been developed. Its functions and connections with other modules are defined. The quality control module of registered ECGs is implemented as a neural network binary classifier based on 2D CNN. To represent the ECGs as an image, a wavelet transform was used. A database of images has been created for training and testing neural networks. *Results and conclusions.* Four deep learning neural networks have been developed in the Python programming language, according to the test results of which the VGGNet19 network showed the best result with an accuracy of 0.97, a logarithmic loss of 0.1 and an F-measure of 0.97. The developed block diagram of the APTECG system and the quality control module of the registered ones will increase the reliability of the diagnostic decisions made.

Keywords: ECGs quality, artificial neural networks, deep learning, ambulatory personal telemonitoring ECG systems

For citation: Krivonogov L.Yu., Gerashchenko M.S., Gerashchenko S.I., Mitroshin A.N., Levin S.F. Neural network module for quality control of registered signals for ambulatory personal telemonitoring ECG systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):116–123. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-13

Введение

Оперативность и доступность оказания кардиологической помощи является одним из стратегических направлений здравоохранения большинства развитых стран мира. Успехи в этом направлении достигаются за счет совершенствования мониторинговых систем и технологий диагностики состояния сердечно-сосудистой системы человека. В последнее время все большую актуальность получает ранняя диагностика сердечно-сосудистой системы, осуществляемая в неспециализированных медицинских учреждениях, по месту работы или учебы, на дому, в условиях свободной активности пациентов. В англоязычных странах такая технология получила название «ambulatory ECG monitoring/telemetry» [1]. В настоящей статье авторы используют свой вариант перевода – «методика амбулаторного персонального телемониторинга ЭКГ (АПТЭКГ)». Амбулаторный персональный телемониторинг ЭКГ является неинвазивной, простой в применении, относительно недорогой и доступной для широких слоев населения методикой [1]. Интерес к ней неуклонно растет за счет массового распространения высокопроизводительных смартфонов, расширения зоны покрытия мобильных сетей, увеличения скорости мобильного Интернета, достаточно низких тарифов операторов мобильной связи.

Высокая достоверность автоматической классификации нарушений сердечной деятельности в системах амбулаторного персонального телемониторинга ЭКГ может быть обеспечена лишь при регистрации электрокардиосигналов (ЭКС) достаточно высокого качества. Качество зарегистрированных ЭКС в первую очередь связано с интенсивностью помех различного происхождения. Высокая интенсивность помех в ЭКС наблюдается при повышенной физической активности пациента или его нахождении рядом с источником промышленных помех, при плохом контакте ЭКГ-электродов с телом. Регистрация и дальнейшая автоматическая интерпретация ЭКС с высоким уровнем помех может привести к диагностическим ошибкам [2]. Проблема регистрации ЭКС низкого качества в системах АПТЭКГ усугубляется отсутствием возможности визуального контроля качества регистрируемых ЭКС квалифицированным кардиологом в течение всего времени исследований, а также не всегда правильным и качественным наложением ЭКГ-электродов самим пациентом.

Необходимо отметить, что применение аппаратных и/или программных фильтров для подавления помех в электрокардиографических системах не всегда эффективно, особенно при высокой интенсивности помех. Обычно фильтры не полностью подавляют помехи, при этом в той или иной мере искажают полезный сигнал (вплоть до имитации патологических состояний). Из этого следует, что в системах амбулаторного персонального телемониторинга ЭКГ для диагностики должны использоваться лишь ЭКС достаточно высокого (допустимого) качества, обеспечивающего достоверную автоматическую классификацию нарушений сердечной деятельности.

Таким образом, для повышения достоверности автоматических диагностических заключений в системах АПТЭКГ необходим контроль качества зарегистрированных сигналов, а при разработке подобных систем целесообразно в их состав ввести модуль контроля качества зарегистрированных ЭКС.

Цель исследования – разработка структуры системы амбулаторного персонального телемониторинга ЭКГ и нейросетевого модуля контроля качества зарегистрированных сигналов в ее составе.

Материалы и методы

При современном уровне развития науки и технологий система АПТЭКГ в своем составе должна иметь один или несколько патч-регистраторов ЭКС (*patch*, англ. – пластырь, заплатка), мобильного устройства пациента (смартфона), сервера приложений и автоматизированного рабочего места (АРМ) кардиолога.

ЭКГ-электроды, усилитель и радиопередатчик интегрированы в патч-регистратор, который представляет собой гибкую эластичную пластинку, клеящуюся на торс пациента. Патч-регистраторы регистрируют ЭКС пациента (чаще всего в одном отведении) и по беспроводному каналу связи передают его на смартфон. Смартфон под управлением специализированного мобильного приложения реализует прием ЭКС с патч-регистратора и его дальнейшую передачу на сервер приложений. На экране смартфона отображаются рекомендации от системы, направленные на обеспечение регистрации качественного ЭКС, сообщения и рекомендации от врача, а при необходимости – зарегистрированный ЭКС.

Программные средства сервера системы обеспечивают подавление помех, классификацию нарушений сердечной деятельности и обеспечивает связь с АРМ кардиолога. Такая конфигурация системы АПТЭКГ не только обеспечивает длительную регистрацию ЭКС пациента в условиях его свободной активности и позволяет оперативно принимать решения (как на уровне сервера приложений, так и на уровне врача), но и обмениваться информацией, необходимой для обеспечения эффективного лечебно-диагностического процесса.

В основу структурной схемы системы АПТЭКГ (рис. 1) была положена обобщенная структура системы ЭКГ-диагностики, предложенная в работе [2]. Зарегистрированный ЭКС (в одном или нескольких отведениях) X поступает в модули подавления помех и контроля качества зарегистрированных ЭКС. После подавления помех сигнал Y поступает в модуль классификации нарушений, результат классификации K отправляется в АРМ-врача и в модуль формирования сообщений и рекомендаций, которые высылаются на смартфон пациента (сигнал F). Врач также формирует сообщения и рекомендации для пациента (сигнал R).

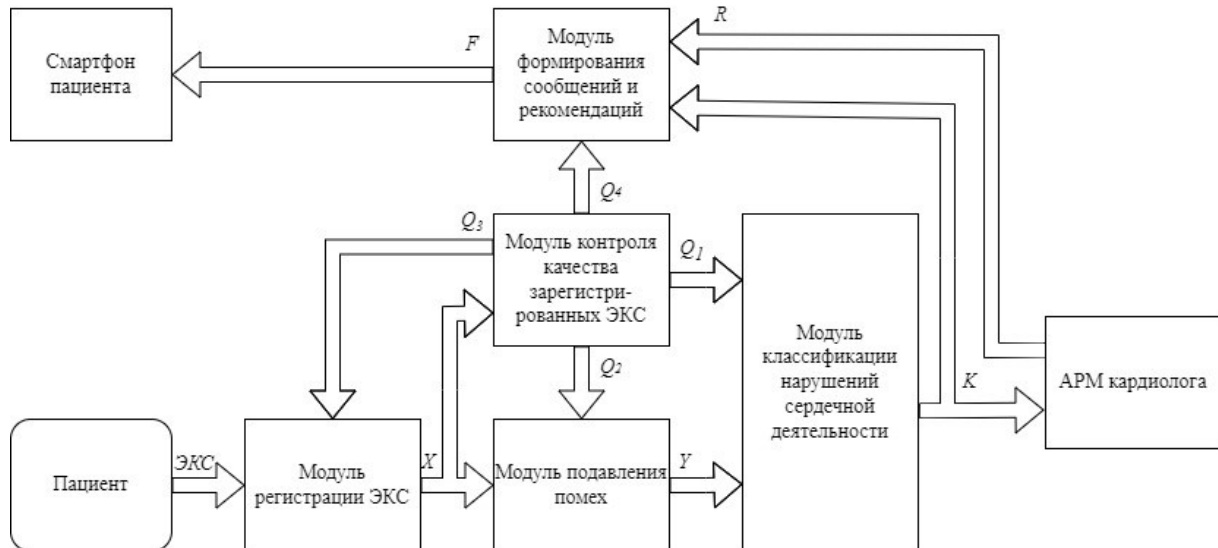


Рис. 1. Структурная схема системы АПТЭКГ

Модуль контроля качества в системе АПТЭКГ выполняет следующие функции:

- 1) формирование сигнала $Q1$ при регистрации ЭКС с недопустимо высоким уровнем помех для остановки классификации нарушений или сокращения функций анализа (чтобы не делать неадекватных диагностических заключений);
- 2) управление фильтрами (сигнал $Q2$) в модуле подавления помех (выбор конкретных фильтров и их параметров в зависимости от типа и интенсивности помех);
- 3) управление выбором наиболее качественных, т.е. менее зашумленных, отведений (сигнал $Q3$) для регистрации и классификации нарушений;

4) управление формированием сообщений и рекомендации пациенту по уменьшению уровня помех (например, снизить физическую активность, выйти из зоны интенсивных помех, проверить/обеспечить контакт электрода с телом и т.д. (сигнал Q4)).

Для реализации всех вышеперечисленных функций модуль контроля качества ЭКС должен определять вид помех и их уровень (интенсивность). Модуль контроля качества зарегистрированных сигналов в настоящее время реализован в виде нейросетевого бинарного классификатора сигналов (приемлимый/неприемлимый).

В ряде научных работ [3–5] показана эффективность применения нейронных сетей глубокого обучения для анализа ЭКС, в том числе и для оценки их качества. В работах [6–8] обоснована перспективность выявления и классификации нарушений сердечной деятельности на основе вейвлет-преобразования ЭКС. Эти технологии (нейросети глубокого обучения и вейвлет-преобразование) и были использованы при реализации модуля контроля качества зарегистрированных ЭКС для системы АПТЭКГ [9–13]. Модуль был реализован как нейросетевой бинарный классификатор на основе сверточных нейронных сетей (2D CNN), а технология вейвлет-преобразования была применена для модификации участков ЭКС в полноцветные изображения [14].

При разработке нейросетевого классификатора в качестве обучающих и тестовых выборок были использованы участки ЭКС из базы данных PhysioNet/Computers in Cardiology Challenge 2011 (Set A challenge/2011/set a) [9]. Выборка состоит из 998 десятисекундных записей ЭКГ, зарегистрированных в 12 отведениях, при этом записи классифицированы на приемлемые (773) и неприемлемые (225).

Всего из базы данных PhysioNet было экспортировано и преобразовано в полноцветные изображения (вейвлет-спектрограммы) 205 приемлемых и 84 неприемлемых ЭКС. При обучении и тестировании классификатора использовались лишь записи II стандартного отведения.

При преобразовании участков сигналов в вейвлет-спектрограммы были выбраны следующие параметры: тип базового вейвлета – мексиканская шляпа (mexh), максимальный масштаб – 1000, цветовая карта – jet. Примеры ЭКС с соответствующими вейвлет-спектрограммами приведены на рис. 2.

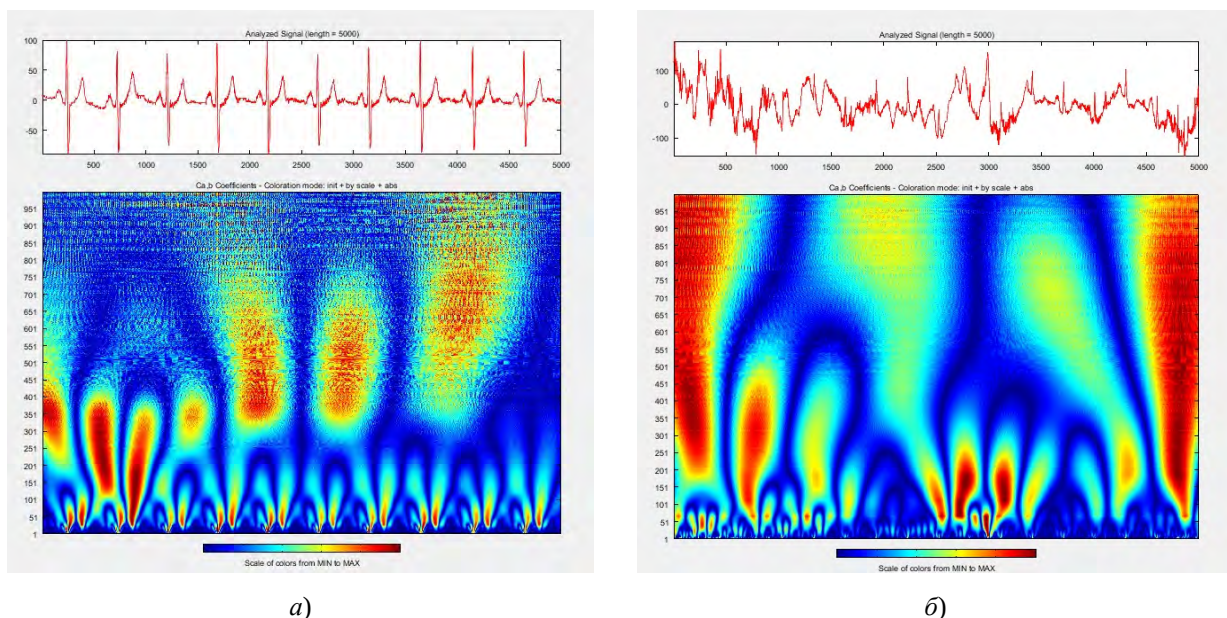


Рис. 2. Примеры допустимого (а) и недопустимого (б) ЭКС и соответствующие им вейвлет-спектрограммы

Из полученных 289 вейвлет-спектрограмм (205 изображений с приемлемым сигналом, 84 – с неприемлемым), сохраненных в формате png, с размерностью 585×386, был создан набор для обучения и тестирования нейронных сетей. Изображения были разделены на обучающую и тестовую выборки. В обучающую выборку вошло 217 изображений (154 приемлемых и 63 неприемлимых, всего примерно 75 % от общего количества), в тестовую – 51 и 21 соответственно [15].

Результаты и их обсуждение

Для моделирования из библиотек PyTorch и TensorFlow были выбраны безвесовые сверточные нейронные сети VGGNet16, VGGNet19, ResNet34, ResNet50, их архитектура была сформирована в программной среде Google Colab (Colaboratory) на языке Python. Выбранные модели имеют высокую эффективность классификации изображений и не требуют больших вычислительных ресурсов, что повышает скорость обработки изображений и обучения моделей [10]. Модели ResNet реализованы с помощью библиотеки PyTorch, а модели VGG – с помощью TensorFlow.

Архитектура моделей VGGNet16/19 состоит из 16/19 весовых слоев соответственно [11]. На начальном этапе исходное полноцветное изображение размером 224×224 пикселя и тремя каналами RGB последовательно проходит через первые два сверточных слоя – Conv1-1 и Conv1-2. Каждый сверточный слой содержит 64 фильтра с размером окна 3×3. Фильтры выполняют операцию свертки с изображением, выделяя различные признаки. Следующим шагом является операция MaxPooling, которая уменьшает размеры карт признаков в два раза. Это позволяет сети сосредоточиться на более важных признаках и уменьшить количество параметров для обработки. После этого следуют два сверточных слоя Conv2-1 и Conv2-2 с 128 фильтрами, имеющими также размер окна 3×3. Результат блока сверточных слоев проходит функцию активации ReLU и формирует конечный тензор размером 7×7×512, который подается на полносвязную нейронную сеть, состоящую из двух скрытых слоев (количество нейронов в первом слое – 4096, во втором – 256) и одного выходного слоя из двух нейронов.

Архитектура ResNet34 и ResNet50 схожа с архитектурой VGGNet, но в отличие от нее в основе ResNet используются блоки с пропусками (residual blocks), которые добавляют прямое соединение (shortcut connection) между входом и выходом слоя, что позволяет эффективно обучать глубокие сети и бороться с проблемой затухающих градиентов [11].

Для обучения и работы всех моделей был настроен полносвязный слой, реализованы глубокие слои (Dense) и функции активации (relu – для первых двух слоев, softmax – для третьего слоя). Для оптимизации весов в процессе обучения выбраны оптимизаторы: для VGGNet – Adam (адаптивная оценка момента – одна из модификаций стохастического градиентного спуска), для ResNet – SGD (стохастический градиентный спуск) [12].

Для предотвращения переобучения обучение моделей VGGNet16, VGGNet19 и ResNet34 было остановлено на эпохе 14, а ResNet50 – на эпохе 12.

Оценка эффективности нейросетевого классификатора (тестирование) была выполнена на основе стандартных метрик качества классификации: точности (accuracy), прецизионности (precision), полноты (recall), логарифмической потери (loss), F-меры (F1Score) [13].

В табл. 1 приведены результаты сравнения эффективности разработанных нейросетевых классификаторов.

Таблица 1

Результат сравнения эффективности нейронных сетей

Модели	Метрики качества			
	Accuracy	Loss	Val_F1Score	F1Score
VGGNet16	0,95	0,17	0,73	0,95
VGGNet19	0,97	0,1	0,72	0,97
ResNet34	0,65	0,23	0,81	0,94
ResNet50	0,65	0,21	0,77	0,76

По результатам тестирования наилучший результат классификации показала VGGNet19 с точностью 0,97; логарифмической потерей 0,1 и F-мерой 0,97. Нейросеть ResNet34 показала наилучшую обучаемость (значение метрики val_F1Score составляет 0,81), что свидетельствует о перспективе ее дальнейшего совершенствования.

Проблема недостаточно высокой обучаемости разработанных классификаторов, по всей видимости, связана с небольшим объемом обучающих данных.

Заключение

Система амбулаторного персонального телемониторинга ЭКГ с нейросетевым модулем контроля качества зарегистрированных сигналов в своем составе, созданная в соответствии с предложенной структурной схемой, обеспечит повышение достоверности диагностических заключений за счет:

- использования для анализа лишь сигналов достаточно высокого (допустимого) качества, адекватно характеризующих электрическую активность сердца;
- выбора конкретных фильтров для подавления помех и их параметров;
- выбора менее зашумленных отведений для регистрации и классификации нарушений;
- формирования рекомендаций пациенту, выполнение которых должно устранить причину или снизить интенсивность помех.

Разработанный нейросетевой классификатор показал достаточную эффективность и имеет все перспективы для дальнейшего повышения точности классификации посредством оптимизации выбор базового вейвлета, типа и размера вейвлет-изображений; использования большего количества отведений и обучающих выборок большего объема.

Направление дальнейших исследований ориентировано на совершенствование классификатора таким образом, чтобы он мог определять тип помехи и оценивать ее интенсивность.

Список литературы

1. Steinberg J. S., Varma N., Cygankiewicz I. [et al.]. ISHNE-HRS expert consensus statement on ambulatory ECG and external cardiac monitoring/telemetry // *Heart Rhythm*. 2017.
2. Кривоногов Л. Ю. Система электрокардиографической диагностики критических состояний в условиях свободной активности пациентов : дис. ... д-ра техн. наук. Пенза, 2017.
3. Исаков Р. В., Сушкова Л. Т. Возможности применения искусственных нейронных сетей для обнаружения искажений ЭКГ. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-primeneniya-iskusstvennyh-neyronnyh-setey-dlya-obnaruzheniya-iskazheniy-ekg>
4. Hannun A. Y., Rajpurkar P., Haghpanahi M. [et al.]. Cardiologist-Level Arrhythmia Detection and Classification in Ambulatory Electrocardiograms Using a Deep Neural Network // *Nature Medicine*. 2019. Vol. 25. P. 65–69.
5. Tae J. J., Hoang M. N., Daeyoun K. [et al.]. ECG Arrhythmia Classification Using a 2-D Convolutional Neural Network // *Computer Science. Computer Vision and Pattern Recognition* arXiv:1804.06812
6. Чупов А. А., Жданов А. Е., Князев С. Т. [и др.]. Обработка сигналов ЭКГ с помощью вейвлет-анализа: диагностические возможности // *Ural Radio Engineering Journal*. 2021. Vol. 5. С. 337–352
7. Синютин С. А. Обработка электрокардиограммы с помощью вейвлет-анализа при холтеровском мониторинге. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/obrabotka-elektrokardiogrammy-spomoschyu-veyvlet-analiza-pri-holterovskom-monitorirovanii/viewer>
8. Kumari G. S., Seeramreddi K., Anusha J., Rao M. P. Electrocardiographic Signal Analysis Using Wavelet Transforms // *International Conference on Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization (EESCO)*. 2015.
9. PhysioNet / Computers in Cardiology Challenge 2011. Set A challenge/2011/set. URL: <https://archive.physionet.org/challenge/2011/>
10. Russakovsky O., Deng J., Hao S. [et al.]. ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge. *IJCV*, 2015.
11. Long Short-Term Memory. URL: <http://www.bioinf.jku.at/publications/older/2604.pdf>
12. Кофендерфер М. Дж., Уилер Т. А. Алгоритмы оптимизации. СПб. : Диалектика, 2020. 528 с.
13. Брюс П., Брюс Э., Гедек П. Практическая статистика для специалистов Data Science. СПб. : БХВ-Петербург, 2021. 352 с.
14. Дарьина А. Н., Прокопьев И. В. Метод нейросетевого управления в реальном времени на основе синтеза функции выбора // *Надежность и качество сложных систем*. 2019. № 4. С. 41–50.
15. Иванов А. И., Куприянов Е. Н., Савинов К. Н. [и др.]. Сокращение требований к объему выборки при проверке гипотезы нормальности биометрических данных через нейросетевое объединение семи статистических критериев // *Надежность и качество сложных систем*. 2019. № 4. С. 69–77.

References

1. Steinberg J.S., Varma N., Cygankiewicz I. et al. ISHNE-HRS expert consensus statement on ambulatory ECG and external cardiac monitoring/telemetry. *Heart Rhythm*. 2017.
2. Krivonogov L.Yu. System of electrocardiographic diagnosis of critical conditions in conditions of free activity of patients. DSc dissertation. Penza, 2017. (In Russ.)
3. Isakov R.V., Sushkova L.T. *Vozmozhnosti primeneniya iskusstvennykh neyronnykh setey dlya obnaruzheniya iskazheniy EKG = The possibilities of using artificial neural networks to detect ECG distortions*. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/vozmozhnosti-primeneniya-iskusstvennyh-neyronnyh-setey-dlya-obnaruzheniya-iskazheniy-ekg>

4. Hannun A.Y., Rajpurkar P., Haghpanahi M. et al. Cardiologist-Level Arrhythmia Detection and Classification in Ambulatory Electrocardiograms Using a Deep Neural Network. *Nature Medicine*. 2019;25:65–69.
5. Tae J.J., Hoang M.N., Daeyoun K. et al. ECG Arrhythmia Classification Using a 2-D Convolutional Neural Network. *Computer Science. Computer Vision and Pattern Recognition arXiv:1804.06812*
6. Chupov A.A., Zhdanov A.E., Knyazev S.T. et al. Processing of ECG signals using wavelet analysis: diagnostic capabilities. *Ural Radio Engineering Journal*. 2021;5:337–352. (In Russ.)
7. Sinyutin S.A. *Obrabotka elektrokardiogrammy s pomoshch'yu veyvlet-analiza pri kholterovskom monitorirovanii = Electrocardiogram processing using wavelet analysis during Holter monitoring*. (In Russ.). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/obrabotka-elektrokardiogrammy-spomoschyu-veyvlet-analiza-pri-holterovskom-monitorirovanii/viewer>
8. Kumari G.S., Seeramreddi K., Anusha J., Rao M.P. Electrocardiographic Signal Analysis Using Wavelet Transforms. *International Conference on Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization (EESCO)*. 2015.
9. *PhysioNet*. Computers in Cardiology Challenge 2011. Set A challenge/2011/set. Available at: <https://archive.physionet.org/challenge/2011/>
10. Russakovsky O., Deng J., Hao S. et al. *ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge*. IJCV, 2015.
11. *Long Short-Term Memory*. Available at: <http://www.bioinf.jku.at/publications/older/2604.pdf>
12. Kofenderfer M.Dzh., Uiler T.A. *Algoritmy optimizatsii = Optimization algorithms*. Saint Petersburg: Dialektika, 2020:528. (In Russ.)
13. Bryus P., Bryus E., Gedek P. *Prakticheskaya statistika dlya spetsialistov Data Science = Practical statistics for Data Science specialists*. Saint Petersburg: BKhV-Peterburg, 2021:352. (In Russ.)
14. Dar'ina A.N., Prokop'ev I.V. The method of neural network control in real time based on the synthesis of the selection function. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2019;(4):41–50. (In Russ.)
15. Ivanov A.I., Kupriyanov E.N., Savinov K.N. et al. Reduction of sample size requirements when testing the hypothesis of the normality of biometric data through a neural network combination of seven statistical criteria. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2019;(4):69–77. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Леонид Юрьевич Кривоногов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры медицинской
кибернетики и информатики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: leonidkrivonogov@yandex.ru

Михаил Сергеевич Геращенко

кандидат технических наук,
доцент кафедры медицинской
кибернетики и информатики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: cts.com@yandex.ru

Сергей Иванович Геращенко

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой медицинской
кибернетики и информатики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: mpo@list.ru

Leonid Yu. Krivonogov

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department
of medical cybernetics and computer science,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Mikhail S. Gerashchenko

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of medical cybernetics and computer science,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Sergey I. Gerashchenko

Doctor of technical sciences, professor,
head of the sub-department of medical
cybernetics and computer science,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Александр Николаевич Митрошин

доктор медицинских наук, профессор,
заведующий кафедрой хирургии,
директор Медицинского института,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: an-mitroshin@mail.ru

Станислав Федорович Лёвин

студент,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: lvin.stanislav.01@mail.ru

Aleksandr N. Mitroshin

Doctor of medical sciences, professor,
head of the sub-department of surgery,
director of the Medical Institute,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Stanislav F. Levin

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 25.11.2023

Поступила после рецензирования / Revised 10.12.2023

Принята к публикации / Accepted 25.12.2023

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

SAFETY IN EMERGENCY SITUATIONS

УДК 004.05, 006.015.8, 519.718, 519.876.2

doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-14

AN INDEX-BASED METHOD FOR INTEGRAL ESTIMATION OF REGIONAL CRITICAL INFRASTRUCTURE RESILIENCE USING FUZZY CALCULATIONS (PART 1. PROBLEM STATEMENT AND METHOD GENERIC STRUCTURE)

A.V. Masloboev

Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling of the Federal Research Centre
"Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences", Apatity, Russia;
Nanomaterials Research Centre of the Federal Research Centre
"Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences", Apatity, Russia
masloboev@iimm.ru

Abstract. *Background.* The study is aimed at developing well-known and designing novel models and methods for decision support in the field of security and resilient operation management of critical infrastructures and socio-economic facilities in the Arctic region of Russian Federation. This urgent problem is especially relevant at the regional level in terms of the need to protectability heightening of critical facilities/infrastructures, cascading effects restricting of the multiple threats of various nature on higher-level systems and favorable conditions providing for mitigation of the negative consequences of influencing factors on the performance of the elements of these systems. *Materials and methods.* For easy understanding, the work structurally is decomposed in two parts. In the first part, a formal problem statement is given. The substantiation of mathematical apparatus for problem-solving is carried out. The generic framework of the developed method for assessment and analysis of the regional critical infrastructures resilience based on a fuzzy-set approach and expert judgements is proposed. In the second part, the efficiency Q-function computational models of the organizational and technical systems resilience, such as anticipation ability, responsiveness, recoverability and adaptability, which are the central elements of the optimization model of critical infrastructures resilience integral index, are examined. *Results and conclusions.* An index-based method for the integral estimation and analysis of the regional critical infrastructures resilience, based on fuzzy calculations of the level and ratio of aggregated reliability, security and robustness indices, has been developed. The method allows on basis of incomplete data to quantify systemic risks affecting the critical infrastructure resilience, performances, savings and possible losses under sampling and implementing the anti-crisis measures at all stages of the resilience management life-cycle. A distinctive feature of the method is its universality, i.e., applicability to all types of critical infrastructures. The method can be practically used by operators and analysts of regional situational centers to train and generate design decisions for counteracting the actual threats and local failures in the operation of regional critical infrastructures under uncertainty.

Keywords: system analysis, resilience, security, critical infrastructure, integral performance index, expert judgement, fuzzy calculations

Financing: the work was carried out within the framework of the State Research Program of the Putilov Institute for Informatics and Mathematical Modeling KSC RAS (project No. FMEZ-2022-0023).

For citation: Masloboev A.V. An index-based method for integral estimation of regional critical infrastructure resilience using fuzzy calculations (Part 1. Problem statement and method generic structure). *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):124–141. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-14

ИНДИКАТОРНЫЙ МЕТОД ИНТЕГРАЛЬНОЙ ОЦЕНКИ ЖИЗНЕСПОСОБНОСТИ РЕГИОНАЛЬНЫХ КРИТИЧЕСКИХ ИНФРАСТРУКТУР НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ (ЧАСТЬ 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ОБЩАЯ СТРУКТУРА МЕТОДА)

А. В. Маслобоев

Институт информатики и математического моделирования имени В. А. Путилова Федерального
исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия;
Центр наноматериаловедения Федерального исследовательского центра
«Кольский научный центр Российской академии наук», Апатиты, Россия
masloboev@iimm.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Исследование направлено на развитие известных и разработку новых моделей и методов поддержки принятия решений в области управления безопасностью и устойчивым функционированием критических инфраструктур и социально-экономических объектов Арктической зоны Российской Федерации. Эта задача особенно актуальна на региональном уровне с точки зрения необходимости повышения защищенности критически важных объектов/инфраструктур, сдерживания каскадных эффектов воздействия множественных угроз различной природы на системы более высокого уровня и обеспечения благоприятных условий для смягчения негативных последствий влияющих факторов на состояние работоспособности элементов этих систем. *Материалы и методы.* Работа состоит из двух частей. В первой части дана формальная постановка задачи, приводится обоснование математического аппарата для ее решения и представлена общая структура разработанного метода оценки и анализа жизнеспособности региональных критических инфраструктур на основе нечетко-множественного подхода и экспертных оценок. Во второй части исследуются вычислительные модели целевых функций качества устойчивости организационных и технических систем, таких как упреждаемость, реактивность, восстанавливаемость и адаптируемость, являющихся центральными компонентами оптимизационной модели интегрального показателя жизнеспособности критических инфраструктур. *Результаты и выводы.* Разработан индикаторный метод интегральной оценки и анализа жизнеспособности региональных критических инфраструктур, основанный на нечетких вычислениях уровня и соотношения агрегированных показателей надежности, безопасности и устойчивости. Метод позволяет на основе неполных данных количественно оценить системные риски, влияющие на жизнеспособность критической инфраструктуры, полезные эффекты и возможные потери при выборе и реализации антикризисных мер на всех стадиях жизненного цикла управления устойчивостью. Отличительной особенностью метода является его универсальность, т.е. применимость ко всем типам критических инфраструктур. Метод может быть использован операторами и аналитиками региональных ситуационных центров для подготовки проектных решений по противодействию актуальным угрозам и локальным сбоям в работе критических инфраструктур региона в условиях неопределенности.

Ключевые слова: системный анализ, жизнеспособность, безопасность, критическая инфраструктура, интегральный показатель, экспертная оценка, нечеткие вычисления

Финансирование: работа выполнена в рамках государственных заданий ИИММ КНЦ РАН (НИР № FMEZ-2022-0023).

Для цитирования: Masloboev A. V. An index-based method for integral estimation of regional critical infrastructure resilience using fuzzy calculations (Part 1. Problem statement and method generic structure) // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 124–141. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-14

Introduction

For several decades, the main emphasis and efforts of developers and experts in the field of risk management of critical infrastructures of various types and levels have been performed on the engineering of security systems and means for comprehensive protection of these essential elements of socio-economic and natural-industrial systems. Real experience shows that in practice ensuring absolute security is an unattainable goal and unjustified in terms of the resources spent. Therefore, at present, the focus of attention of Russian and foreign researchers is gradually shifting towards studying the issues of developing and analyzing resilient systems that can withstand multiple threats of various natures. Resilience is a fundamentally new concept that significantly expands the modern theory of the safety of complex systems in terms of the development of approaches to managing the processes of timely recovery and adaptation of critical functions and operating characteristics of dynamic systems under the influence of negative factors. The application of such approaches allows, along with traditional problem monitoring and preventive risk management, to mitigate the

consequences of multiple threats implementation within critical infrastructures and facilities, as well as to design flexible self-organizing security systems in order to effectively counter these threats. Meanwhile, it is significant to note that due to the large variety of diverse aspects of resilience, measuring and maintaining this inherent performance characteristic of complex dynamic systems is a nontrivial interdisciplinary problem.

In modern scientific literature for different research disciplines and classes of systems, accordingly, one can find many different, but similar in meaning, definitions of the "resilience" concept, which historically arose in the study of the environmental sustainability of natural systems, and then became the objective of analysis in closely-related fields. For the general case in this work, the resilience of critical infrastructure is understood as such a property of self-preservation of the system, in which elements of the critical infrastructure and the infrastructure (system) as a whole, subjected to the influence of negative factors, are able to anticipate and absorb the consequences of the multiple threats intra-implementation, and timely restore their functionality (critically important functions) and adapt to changing operating conditions, thereby effectively resisting the destructive impacts and dangers emanating from objects of the external and internal environment.

In a broad sense, critical infrastructure is an important part of socio-economic systems and is a set of interdependent significant objects distributed over a certain territory that perform critical functions to ensure the normal operation of the social sphere, the economy and the state as a whole. Violation or loss of functionality of at least one of these objects can lead to a significant decrease in the level of safety and quality of life of the population, including public health and well-being, as well as have a destructive impact on other objects of this system, destabilizing the entire system and obstructing the preservation of essential functions necessary for its sustainable development. Thus, critical infrastructure, in essence, is a life-supporting subsystem for higher-level systems: local, regional, federal and international. Any critical infrastructure is exposed to external threats and has its own life-cycle of responding to crisis situations and adverse events. It is customary to distinguish between "hard" (physical and virtual objects and networks, production assets, technical systems) and "soft" (socio-economic objects and systems) critical infrastructures.

To ensure effective management of the soft critical infrastructures resilience, it is necessary to conduct an integrated assessment and audit of their stability, reliability and safety on a regular basis. Meanwhile, such an assessment is hampered by the lack of retrospective data on typical critical situations and the incompleteness/limitation of information on current threats and the ways of their impact on elements of critical infrastructure. At once, most monitoring systems used in regional situational centers are just not designed for modeling and assessing factors affecting the resilience of critical infrastructures. Additional difficulties for preventive analytics are arisen by the human factor, which is not always measurable. In addition, the integral resilience assessment uses various quantitative and qualitative indicators, which must be measurable, realistic, attainable, time-bound and agreed upon, as well as reflect the specific context and class of resilience (technological, organizational, personal, societal, etc.). However, not all reliability, safety and stability indices, as well as the factors influencing them, can be taken into account in the assessment, since they cannot be measured. This reduces the adequacy of known resilience models and the validity of resilience total estimates derived on their basis. This is especially typical for the resilience of "soft" critical infrastructures, in which critical situations are unique each time, that is, rarely repeated, and the uncertainty, fuzziness or insufficiency of initial data for analyzing the system behavior before, during and after the occurrence of adverse events can only be compensated by involving a team of experts in the field corresponding to the problem context and resilience domain.

Thus, an integral assessment of the critical infrastructures resilience should be carried out based on the use of formal models of aggregated indicators of reliability, safety and stability of dynamic systems in combination with expert judgements and fuzzy calculation methods. This will ensure the accounting of data uncertainty and expert subjectivity when assessing the resilience of critical infrastructures.

Subject to the considered features, this study is aimed at developing tools for information and analytical support of the situational control of multi-level distributed systems resilience, in particular, novel methods and models for assessing and analyzing the resilience of regional critical infrastructures, taking into account both organizational and technical factors influencing operating performance characteristics of this class of systems. The work is divided into two parts. The first part consists of three sections. The first section discusses the methodological foundations of the study and provides a rationale for the choice of mathematical apparatus for solving the stated problem. The second section provides a formal problem statement. The third section is key and encloses a description of the general structure of the developed index-based method for integral estimation of the regional critical infrastructures resilience, based on fuzzy calculations of the level and ratio

of aggregated reliability, safety and stability indices. Herein, the corresponding formalism and mathematical manipulations are expressed. The summary outlines the highlights, strengths and limitations of the proposed fuzzy approach to analyzing and measuring the critical infrastructures resilience. Conclusions are drawn on its applicability for the class of systems under examination.

Background and methodology

To date, the academic literature presents various approaches and methods of assessment and analysis of the system resilience of various types and scales, including critical infrastructures. The well-known methodologies can be conditionally classified as follows: empirical methods based on observations of the operating conditions of an object or facility, systematic problem monitoring of its condition, data acquisition and statistical analysis for the purpose of running experiments and testing hypotheses; heuristic methods based on practical experience and intuition of risk managers, security experts, analysts and operators of critical facilities and infrastructures; simulation methods based on mathematical and computer modeling; conceptual approaches (frameworks) based on conceptual analysis and ontological modeling; index-based methods based on the metrics (a system of state indicators) design of an object/process and analysis of the dynamics of these indicators.

Empirical methods are used to quantify the resilience of a system. When using empirical methods, based on the analysis of retrospective data on the system behavior over time, curves for the number of failures and recovery of the system after a malfunction are constructed. At the same time, empirical methods are divided into deterministic and probabilistic. Deterministic methods typically assume that the system's performance is in a perfect condition before the failure, and that measures to restore the system's functionality are taken immediately after the failure. However, de facto organizational and technical systems degrade over time, and the process of their restoration is characterized by delays in results due to the influence of various factors, including force majeure circumstances, e.g., financial restrictions, logistics availability or a long-term process of making managerial decisions. To effectively assess the resilience of a system, it is necessary to first identify these influencing factors and then quantify their impact. However, most studies based on empirical approaches often ignore these types of influencing factors and, in addition, rely substantially on the homogeneity, availability and validity of historical data on the manner of system behavior. In reality, such assumptions are in many cases not always justified and acceptable. Despite this, empirical methods allow one to obtain more accurate and reliable (valid) results compared to heuristic approaches, although they are more resource-intensive. Heuristic methods do not always guarantee an optimal strategy for enhancing the resilience of a system, but they can ensure prompt decision-making when the system does not have step-by-step instructions (a clear algorithm) on how to operate in previously unknown critical situations.

On the other hand, methods based on computer modeling simulate the system behavior and dynamically model its performance characteristics over time. These methods are quantitative and allow one to examine how the system structure and components affect the resilience of the system as a whole. They can be applied to various classes of systems (industrial, transport, natural, socio-economic, technical). To quantify resilience, these methods typically use fuzzy models, Bayesian networks, Monte Carlo simulations, optimization methods, etc. Bayesian networks are usually used when there is uncertainty and incompleteness of the initial data on the system status and behavior. State-of-the-art studies are based mainly on the assumption that systems are of a static nature, that is, they do not take into account the time dimension. This is done for the convenience of studying a specific object. However, most real systems still have a dynamic nature and Bayesian networks are widely used today to analyze the characteristics of just such systems. For example, to estimate the resilience of energy critical infrastructure, an approach based on a combination of dynamic models of Bayesian networks and Markov chains is used. When modeling the resilience of systems, optimization methods are traditionally used to determine the optimal operating modes of the system with given operating characteristics and target indicators of reliability, fault tolerance and security of the system, as well as with minimal resource costs for the process of restoring the system after a failure of one or more of its elements. Developing adequate simulation models to assess the resilience of large-scale systems is a complex, expensive process that requires substantial time outlay and the involvement of highly qualified specialists from various fields of knowledge. At once, these models may require extensive operational data, as well as a variety of multi-faceted technical and management information. Thus, the development and application of simulation-based methods and models for assessing resilience is limited only by the capabilities of experts, analysts and organizations performing security auditing and risk analysis of malfunction of the systems of a particular class.

Conceptual approaches (frameworks) provide a qualitative assessment of the resilience of complex systems and are typically used to conceptualize the resilience framework. For this purpose, conceptual, ontological or other types of graph models are designed that reflect the semantic matter of the resilience category and components, as well as the relationship between the system resilience and the factors influencing it. Since these models are qualitative, they are sufficiently rarely used in resilience assessment of industrial and technical systems, but they show effectiveness in analyzing the resilience of organizational and socio-economic systems.

Index-based approaches are based on a comprehensive analysis of the target quantitative and qualitative indicators of the operating and service conditions of the system, which makes it possible to examine and evaluate the dynamic characteristics of the system resilience including influencing and contributing factors. In this case, the integral resilience index is calculated by aggregating selected indicators and identified factors using the weighted average estimation method. Index-based approaches belong to the class of semi-quantitative methods, which ensures their applicability for assessing the robustness and resilience of both engineering and technical systems, as well as socio-economic facilities and infrastructures. The generic structure of index-based methods takes into account the weighting coefficients for the resilience indicators and system components and relies on quantitative and qualitative historical and operational data on the system behavior before and after the occurrence of critical events. To minimize the uncertainty of the raw data and reduce the dependence of the output results of index-based methods for measuring resilience on the quality of input information, fuzzy modeling and expert judgements are used. Fuzzy estimation methods also make it possible to qualitatively take into account observable and unobservable factors that have a direct or indirect impact on the target indicators of system resilience (reliability, robustness, recoverability, adaptability, etc.). Meanwhile, it is worth noting that the state-of-the-art index-based methods scientifically are not sufficiently developed in terms of identifying and quantifying these influencing factors. Thus, to date, the following index-based approaches are widely known [1, 2]:

- Resilience Framework BRIC (Baseline Resilience Indicators for Communities) [3], USA;
- Resilience Framework P.E.O.P.L.E.S (Population and demographics, Environmental and Ecosystem, Organized governmental services, Physical infrastructure, Lifestyle and community competence, Economic development, Social-cultural capital) [4], USA;
- The Benchmark Resilience Tool (BRT) [5], New Zealand;
- Guidelines for Critical Infrastructures Resilience Evaluation ("Guidelines"/CIRE) [6], Italy;
- The Critical Infrastructure Resilience Index (CIRI) [7], Norway;
- Resilience Management/Measurement Index (RMI) [8], USA;
- Organizational Resilience Health Check (ORHC) [9], Australia;
- Resilience Analysis Grid (RAG) [10], Denmark;
- "Swiss Approach" [11], Switzerland;
- Resilience Matrix-based Integral Estimation Approach (RMIEA) [12], Russia;
- Resilience Multi-dimensional Data Cube (ROLAP-cube) [13], Germany.

Applications of these methods have been successfully reflected in the practice of managing the safety and resilience of critical infrastructures and large-scale systems at the regional level. However, in practice, difficulties arise in obtaining an integral estimation of the system resilience, since there are many dimensions of resilience domains (organizational, technological, ecological, socio-economic, etc.), and their matter and characteristics differ significantly. At the same time, for the completeness of the assessment it is necessary to join everything into a comprehensive whole on the basis of a uniform, clear methodology suitable for all classes of systems, types of critical infrastructures and domains of resilience. To solve this problem a fuzzy index-based method was designed, which is proposed in this study and combines the advantages of well-known risk analysis practices of complex systems and resilience assessment methodologies.

The choice of the mathematical apparatus of fuzzy set theory for developing a method for integral estimation of the regional critical infrastructures resilience is conditioned by the fact that the fuzzy set approach allows taking into account not only the uncertainty and fuzziness of the input data, which are characteristic of the class of systems under examination having a complex heterogeneous structure and component composition, as well as depending on factors of various nature, but also the preferences of experts when making decisions on the targeted management of critical infrastructure. The integral critical infrastructure resilience index based on fuzzy estimates is calculated by combining fuzzy variables and fuzzy logic rules into a unified model that allows assessing the risk level of critical infrastructure and determining the best strategy to improve and enhance the resilience of this infrastructure (system). This index is presented in the form of a certain numerical value that reflects the magnitude of critical infrastructure resilience under the influence of external factors and given operating characteristics of its system elements.

Problem statement

The resilience of dynamic systems such as critical infrastructures is characterized by a multi-purpose directedness, that is, the need to simultaneously achieve several goals subject to situational factors. This typically requires evaluating and optimizing multiple metrics (indices) that meet those goals and specified constraints. Moreover, these indicators may not be consistent and be in mutual contradiction with each other, when improvement in one of the indicators leads to deterioration in another, and vice versa, and meeting the requirements of all criteria is not possible in some conditions. However, criteria and restrictions are not always defined precisely. For such cases, the search for optimal solutions is impossible without taking into account qualitative information on the preferences of various criteria, the expected manner of the system behavior (increasing or decreasing the parameters of the quality objective functions), the dynamics and acceptable limits of system efficiency indices, etc. Thereby, the given problem of analysis and assessment of the critical infrastructures resilience is a fuzzy multi-criteria problem.

The main problems in analyzing and assessing the resilience of complex systems at the stages of the crisis management life cycle (risk assessment, prevention, preparedness, warning, response, recovery, mitigation and learning) [14, 15] are the complete or partial lack of information on the quantitative characteristics of the system status, as well as the subjectivity of experts in determining and assessing these indicators. Thus, when predicting the occurrence of the adverse events in the process of situational control of the system resilience, it is often necessary to evaluate only the expected values of performance quality indicators of the system, that is, the most likely loss of functionality in the event of malfunctions and disruptions in its operation. In real practice, this is usually implemented at a qualitative level, since a considerable part of the system resilience characteristics due to their subjective nature is less amenable to quantitative measurement than generally adopted reliability, safety and fault tolerance indicators of technical systems.

To calculate the integral resilience index of a system (critical infrastructure), which depends on many parameters, it is necessary, first of all, to evaluate a set of basic indicators that characterize the system ability to self-preserve and maintain this protective property, as well as to estimate them taking into account the context of the situation, influencing factors, type (soft/hard) and domain (technological, organizational, personal, cooperative) of resilience. A set of basic indicators include: anticipation and prevention ability, absorbability and responsiveness, robustness and recoverability, adaptability and self-organization ability. Such an integral assessment is obtained on the basis of a mixed (additive-multiplicative) convolution of partial criteria and indices that form these indicators at the lower level of decomposition. In addition, the calculation of the integral index of system resilience should take into account the assessment of the level and ratio of the following expected effects from the implementation of control actions aimed at enhancing the system resilience: system performance (useful effect), resource and cost savings, risk of unexpected failures and losses. The backbone components of a multi-level metrics system for integral estimation of the regional critical infrastructures resilience are represented in Table. 1.

Next, the formal problem statement of system resilience assessment will be considered.

Let it be given the following initial problem specification:

$RCP = \{rcp_1, rc_2, \dots, rcp_n\}$ is a set of strategies (control programs) to maintain the resilience of regional critical infrastructure, optimizing the performance characteristics of the system elements of this infrastructure;

$RC = \{RC_{AP}, RC_{AR}, RC_{REC}, RC_{AD}\}$ is a set of backbone (target) capacities of system operation performance, characterizing the ability of critical infrastructure to self-preservation and resilience maintenance under the influence of multiple threats (influencing factors), where: RC_{AP} is a system anticipation and prevention ability, RC_{AR} is a system absorbability and responsiveness, RC_{REC} is a system robustness and recoverability, RC_{AD} is a system adaptability and self-organization ability;

P, S, R is a set of expected effects from the implementation of strategies (control programs) RCP aimed at enhancing the system resilience, where: P is a useful effect (system performance), S is a resource effect (amount of resources saved, operationability), R is a cumulative effect of the probabilities of unforeseen events emergence (risk level of system functionality losses, the amount of possible damage);

$IND = \{IND_{RC_{AP}}, IND_{RC_{AR}}, IND_{RC_{REC}}, IND_{RC_{AD}}\}$ is a set of quantitative and qualitative indicators that are used for multifactor analysis and index-based estimation of target quality functions of the system, as well as multicriteria analysis of applied strategies for managing the resilience of critical infrastructure, taking into account the required (predicted) values of performance characteristics and efficiency indices P, S, R , where:

$IND_{RC_{AP}} = \{IX_1, IX_2, \dots, IX_k\}$ is a set of partial indicators of the lower level of assessment decomposition, on the basis of which an overall index of the system anticipation and prevention capability

$RC_{AP} = \{ IND_{RC_{AP}} | (P_{AP} : S_{AP} : R_{AP}) \rightarrow opt \}$ is calculated in terms of expected effects and strategies RCP are evaluated, accordingly;

$IND_{RC_{AR}} = \{ IX_1, IX_2, ..., IX_l \}$ is a set of partial indicators of the lower level of assessment decomposition, on the basis of which an overall index of the system responsiveness and absorption capacity $RC_{AR} = \{ IND_{RC_{AR}} | (P_{AR} : S_{AR} : R_{AR}) \rightarrow opt \}$ is calculated in terms of expected effects and strategies RCP are evaluated, accordingly;

$IND_{RC_{REC}} = \{ IX_1, IX_2, ..., IX_m \}$ is a set of partial indicators of the lower level of assessment decomposition, on the basis of which an overall index of the system robustness and recoverability $RC_{REC} = \{ IND_{RC_{REC}} | (P_{REC} : S_{REC} : R_{REC}) \rightarrow opt \}$ is calculated in terms of expected effects and strategies RCP are evaluated, accordingly;

$IND_{RC_{AD}} = \{ IX_1, IX_2, ..., IX_q \}$ is a set of partial indicators of the lower level of assessment decomposition, on the basis of which an overall index of the system adaptability (adjustment shift) $RC_{AD} = \{ IND_{RC_{AD}} | (P_{AD} : S_{AD} : R_{AD}) \rightarrow opt \}$ is calculated in terms of expected effects and strategies RCP are evaluated, accordingly.

Table 1

Backbone components of integral estimation of the regional critical infrastructures resilience

Resilience Type & Domain	Soft (socio-economic systems) / Hard (engineering systems) Technological, Organizational, Personal, Cooperative, Societal, Ecological, Cyber, etc.			
Expected Contribution	Resilience Capacity			
	Anticipation & Prevention Ability (RC_{AP})	Absorbability & Responsiveness (RC_{AR})	Recoverability (RC_{REC})	Adaptability (RC_{AD})
Performance & Useful Effect (P)	– Preparedness Degree – Reliability – Detection ability – Prognostic & Health Management (PHM)	– Robustness – Fragility – Stress rate testing – Damage Level & Limitation Exercise (Limits of disruption, deviation & negative disturbance)	– Maintainability (technological repairability) – Supportability – Modularity – Segregability – Decomposability – Restoration Index – Resistance/Resistivity – Downtime reduction	– Technological Upgradability – Technological Transformability – Integrability – Interoperability – Composability – Reconfiguration Ability
Resource & Cost Saving (S)	– Planned Maintenance – Joint Activity Cooperation Plan (Agreements)	– Internal Redundancy – Resource Deployment – Coordination (Degree of Concordance) – Communication Plan & Facilitation Ability – Facilities & Assets Reduction	– Safety Margin – External Redundancy – Unplanned Maintenance – Reduced Service Level & Costs – Personnel Availability – Recovery Time	– Personnel Availability – Spare Parts Availability – Resource Storage Capacity – Long-term/short-term Reconstruction
Loss & Failure Risk (R)	– Protectability – Operability – Error & Disturb Sensitivity	– Vulnerability – Independency – Situational Awareness	– Functionality – Feasibility – Autonomy – Insurance – Restart ability	– Self-organization ability – Creativity & Improvisation
Resilience Life-Cycle Analysis Phase	Risk Monitoring & Identification (Early Warning, Alarm, Pre-Event Risk Auditing)	Risk Initiation & Implementation (Acting Threat & Impact Absorption, System Response)	Risk Treatment & Evaluation (Elimination & Reduction of Post-Event Consequences)	Risk Mitigation & Learning (System Features & Capabilities Strengthening)

To determine the values of indicators an assessment procedure based on expert judgements and parametrization is used. Let E be the number of experts involved in the system examination and expertise.

Then the problem of integral estimation of the critical infrastructure resilience is formulated in the form of two interconnected subproblems, by solving which it is possible to determine a set of effective strategies for managing the system resilience under given conditions and restrictions.

The first problem expects ranking the elements of multiple strategies set RCP according to aggregated indicators $IND_{RC_{AP}}, IND_{RC_{AR}}, IND_{RC_{REC}}, IND_{RC_{AD}} \subset IND$ taking into account the preferences of E experts and the competence of expert judgments (assessments).

The second problem using the output results of the first problem solved expects evaluating the optimal strategy $RCP^* \subseteq RCP$ for ensuring and maintaining the resilience of the system (critical infrastructure) on the basis of calculating target efficiency indices of system operation performance $RC_{AP}, RC_{AR}, RC_{REC}, RC_{AD}$ for each strategy $rcp_i \in RCP, i = \overline{1, n}$ in terms of the ratio of design values of the expected effects P, S, R from the implementation of the strategy and the obtained aggregated estimates of the partial indicators of system resilience $IND_{RC_{AP}}, IND_{RC_{AR}}, IND_{RC_{REC}}, IND_{RC_{AD}} \subset IND$, that is, for each strategy $rcp_i \in RCP, i = \overline{1, n}$ it is required to calculate the overall resilience index ORI of the system by a set of parameter estimates of the quality objective functions (resilience capacities) $RC_{AP}, RC_{AR}, RC_{REC}, RC_{AD}$ decomposed subject to the types and domains of resilience involved in the analysis, as well as subject to the selected context and situational factors. Based on the output results of calculations and comparison of the obtained integral estimates of indicators for each strategy, it is needed to evaluate the optimal program for managing the system resilience acceptable and balanced for the given conditions and restrictions.

Problem-solving procedure and method structure

The general structure of the method for integral multi-level assessment of the resilience of regional critical infrastructures is shown in Fig. 1.

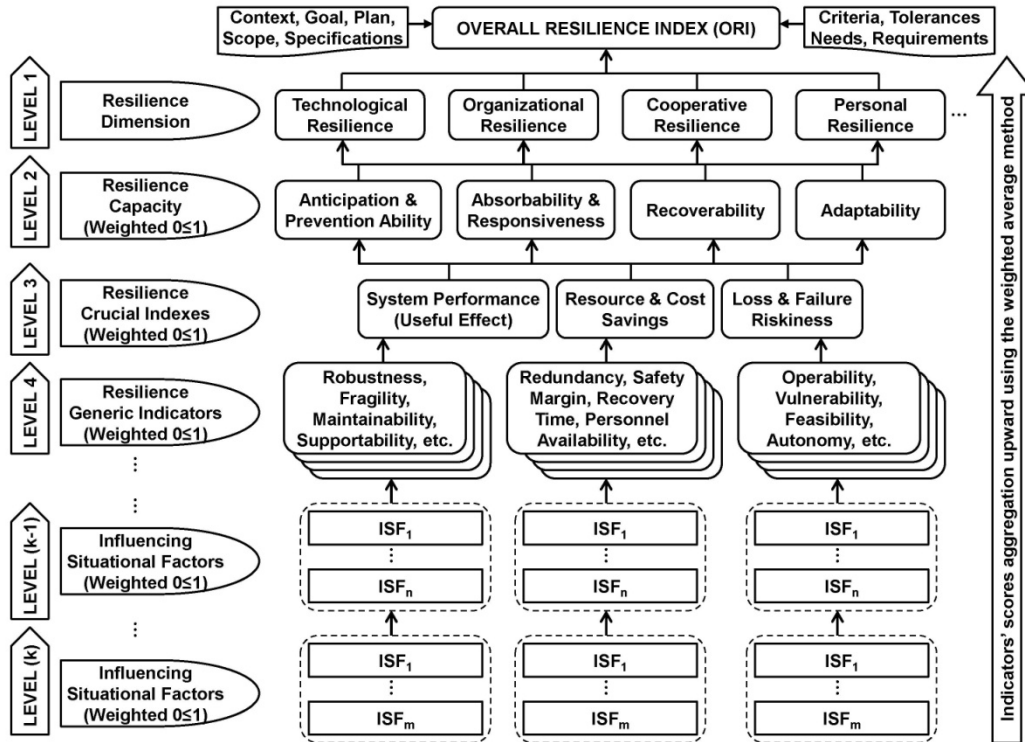


Fig. 1. The hierarchy framework (structure) of proposed methodology for estimation of regional critical infrastructure resilience

To solve the first subproblem the standard method proposed in study [16], well-tested on the problems of assessing the effectiveness of innovation and investment projects, is used. Guided by this method, sets of

quantitative and qualitative indicators $IND = \{IND_{RC_{AP}}, IND_{RC_{AR}}, IND_{RC_{REC}}, IND_{RC_{AD}}\}$ characterizing the basic performance criteria of the system operation are represented as fuzzy sets and are specified using membership functions in the form of triangular or trapezoidal fuzzy numbers on universal sets of alternative strategy options RCP . The membership functions of fuzzy sets are determined on the basis of expert data on paired comparisons of alternatives using the T.L. Saaty analytic hierarchy process [17]. The ranking of alternatives based on the intersection of fuzzy sets is implemented according to the R.E. Bellman and L.A. Zadeh principal scheme known in decision theory [18].

When assessing indicators, experts determine the minimum possible, the most optimistic (or the range of the most optimistic values) and the maximum possible values of estimates of these indicators (influencing factors) at the appropriate level of metrics decomposition of the system resilience indicators.

To transform fuzzy explicit expert judgments on the state of system resilience indicators into crisp characteristics for the purpose of follow-up processing its scores in a defuzzified form, a defuzzification procedure for the obtained fuzzy expert estimates is applied to fuzzy sets, based on the principle of selecting a control action corresponding to the maximum value of the membership function and the centroid method of defuzzification (mean-center method) [19].

All obtained triangular fuzzy estimates for each indicator at the level k must be aggregated. Therefore, when the number of experts is E and when the triangular fuzzy estimate of the e -th expert judgment on the current state of the j -th indicator at the level k is $\tilde{ix}_{cije} = (ix_{cije}^1, ix_{cije}^2, ix_{cije}^3)$, $e = \overline{1, E}$, the integral triangular fuzzy estimate of all expert judgments ($\tilde{IX}_{cij}$) on the state of the j -th indicator at the level k can be obtained based on following formulation:

$$\tilde{IX}_{cij} = (ix_{cij}^1, ix_{cij}^2, ix_{cij}^3) = \left(\min_E \{ix_{cije}^1\}, \frac{\sum_{e=1}^E ix_{cije}^2}{E}, \max_E \{ix_{cije}^3\} \right), e = \overline{1, E},$$

where « $\sim$ » is a sign denoting a fuzzy set; $ix_{cije}^1, ix_{cije}^2, ix_{cije}^3$ are the minimum possible, the most optimistic and the maximum possible values of the e -th expert judgment of the current state of the j -th indicator at the level k , respectively.

Aggregated triangular fuzzy numbers are fuzzy expert judgments (estimates) of the current state of indicators at the level k . As a result of defuzzification, these fuzzy estimates are converted into crisp estimates. The crisp value of a triangular fuzzy number is evaluated by its crisp probabilistic average value. Then, a crisp estimate of the current state of the j -th indicator (IX_{cij}) at the level k can be obtained using the following formulation:

$$IX_{cij}^k = \bar{M}(\tilde{IX}_{cij}^k) = \frac{(ix_{cij}^1 + 4ix_{cij}^2 + ix_{cij}^3)}{6}.$$

The score of each indicator at the level $(k-1)$ is calculated as a weighted sum of the scores of the partial indices generating it at the lower level k using the formulation:

$$(IX_{ci})_{k-1} = \left(\sum_{j=1}^{n,m} w_j IX_{cij} \right)_k, \sum_{j=1}^m w_j = 1,$$

where m is the number of partial indices associated with i -th indicator at the level $k-1$; w_j and IX_{cij} are the weight and estimate of the j -th index at the level k , respectively, and take values in the range $[0, 1]$.

In a similar way, index scores are obtained for higher levels of indicators $(k-2), (k-3), \dots$ by bottom-up aggregating till top of the assessment hierarchy:

$$(IX_c)_{k-2} = \left(\sum_{c,i=1}^{l,n} v_i IX_{ci} \right)_{k-1}, \sum_{i=1}^n v_i = 1,$$

$$(IX_p)_{k-3} = \left(\sum_{c=1}^l u_c IX_c \right)_{k-2}, \quad \sum_{c=1}^l u_c = 1,$$

$$\dots$$

At the top level of hierarchical system of the assessment criteria and index decomposition, the generalized estimate of the overall index of critical infrastructure resilience is calculated as the weighted average of the estimates of all characteristics of the considered dimensions (domains) of system resilience using the following formulations:

$$ORI = \frac{1}{RD} \sum_{p=1}^{RD} \rho_p IX_p,$$

$$ORI = \frac{1}{RD} \sum_{p=1}^{RD} \rho_p \left[\frac{1}{l} \sum_{c=1}^l u_c \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \left[\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m w_j IX_{cij} \right] \right] \right],$$

$$\sum_{c=1}^l u_c = \sum_{i=1}^n v_i = \sum_{j=1}^m w_j = 1,$$

where IX_p and ρ_p are the final estimates and weights of the p -th resilience domain of critical infrastructure at the upper level of system decomposition, respectively; IX_{cij} are estimates of partial indices of the critical infrastructure resilience at levels $(k-2)$, $(k-1)$, (k) , respectively; $l, n, m, \dots$ are the numbers of estimated resilience indices of critical infrastructure at levels $(k-2)$, $(k-1)$, (k) , respectively; $u_c, v_i, w_j, \dots$ are the weights of the partial resilience indices of critical infrastructure agreed upon by experts and determined at levels $(k-2)$, $(k-1)$, (k) , respectively; RD is a number of considered resilience domains for the critical infrastructure under examination.

The measure of agreement of defuzzified expert judgments (estimates) is determined on the basis of calculating the coefficients of concordance and variability (spread in values), taking into account not only paired comparisons, but also the general structure of the assessments. If the values of these coefficients are more than 0.7 and less than 0.2, respectively, then the expert judgments are considered agreed upon. Otherwise, to achieve and provide agreement among expert judgments, the Delphi technique or its modifications are used.

To determine the ranks of system performance criteria (resilience indicators) at all levels of index-based assessment, experts use a matrix of paired comparisons of these criteria, which has the property of transitivity and is designed on a nine-point T.L. Saaty scale.

The reliability of estimates of the criteria ranks depends on the completeness and quality of expert data used in generating the matrix of paired comparisons, and is determined on the basis of relative agreement index calculation, which characterizes the degree of violation of the numerical (cardinal) and transitive (ordinal) agreement of paired comparisons. According to the study [17], in practice, acceptable agreement of paired comparisons should be no more than 10 % (for a range of problems up to 20 % is allowed). Otherwise, experts need to reconsider their judgements (estimates).

After determining the membership functions, ranks of criteria and ranks of experts, running the aggregation of estimated quality indices into a quantitatively measurable integral performance criterion is carried out. According to research [16], for this purpose it is advisable to use R.R. Yager convolution [20], designed for the case of unequal criteria and most fully reflecting the qualitative nature of setting the preferences of experts when engineering an integral performance index model, in comparison with additive and multiplicative convolutions. In addition, it is noted that when using this type of convolution, the compensation effect is leveled out, when inadequate ratings for ones criteria can be compensated for by high ratings for others.

As a result of performing all the above operations, a rating of system resilience management programs is constructed by each expert individually or by a special expert team. In the case of a group examination, the judgements of each expert must be raised to the power of his competence, i.e., adjusted. For this purpose, a paired comparisons matrix of the expert judgements competence is also constructed and the eigenvector of this matrix is evaluated, a multiplicative convolution of the results obtained at the previous steps is performed.

In this way, an overall quality rating of system resilience management programs is generated subject to the preferences and judgements (estimates) of all experts. The optimal strategy according to the maximin approach [21] is such a control program that provides a guaranteed result subject to the significance measure of criteria, ranks and competence of expert judgements, i.e., obtaining a Pareto optimal problem solution while meeting the requirements of specified performance criteria and restrictions.

The algorithm for calculating the overall index of system resilience based on the stages of fuzzy calculations discussed above is schematically outlined in Fig. 2.

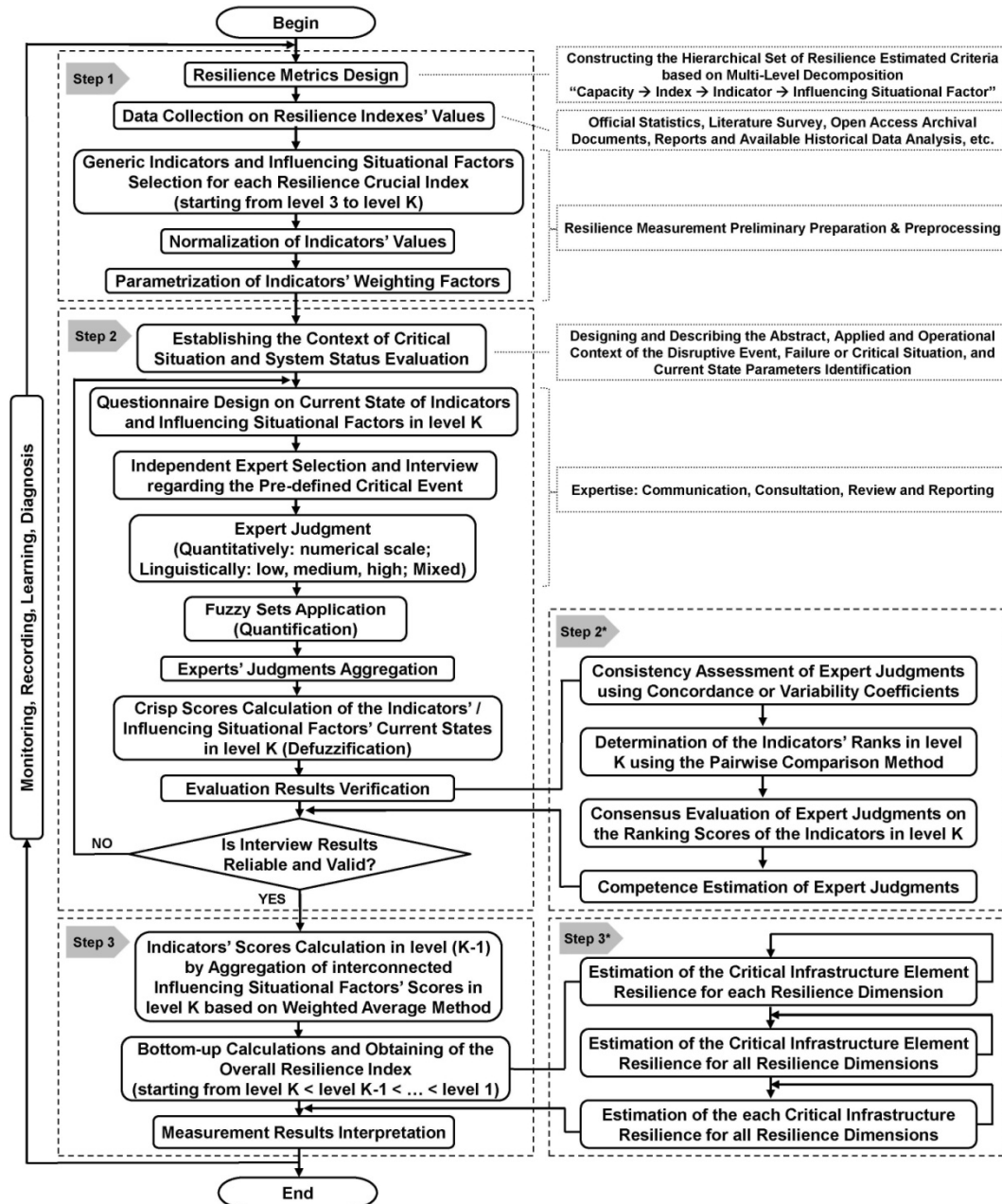


Fig. 2. The established procedure (algorithm) for overall resilience index (ORI) fuzzy calculation

Formal manipulations and procedures for calculating membership functions, the measure of concordance of the expert judgements, criteria ranks and expert ranks, as well as determining the competence of expert judgements are quite general for solving a wide range of problems and are expounded in detail in the work [16]. This mathematical apparatus found an application to the problem assigned in our study and was adopted to solve it in terms of ranking alternative strategies for managing the resilience of critical infrastructures in dynamically changing conditions according to integral estimates of the performance indicators of the system operation, obtained on the basis of fuzzy calculations.

Let us move on to solving the second subproblem. Based on the obtained aggregated values of system resilience indicators $IND_{RC_{AP}}, IND_{RC_{AR}}, IND_{RC_{REC}}, IND_{RC_{AD}} \subset IND$ for all levels of index-based assessment, expressed in defuzzified form, for each system resilience domain involved in the issue consideration, target indicators (quality functions / capacities) of the system operation performance $RC_{AP}, RC_{AR}, RC_{REC}, RC_{AD}$ are calculated based on a set of parameter estimates of the expected effects P, S, R from the implementation of i -th resilience management strategy $rcp_i \in RCP, i = \overline{1, n}$. Next, an additive-multiplicative convolution is applied to the obtained calculated values of target indicators $RC_{AP}, RC_{AR}, RC_{REC}, RC_{AD}$ for all domains of system resilience subject to the ranks of these indicators (i.e., the contribution of each target index to the generalized estimate).

A computational model of the integral index of critical infrastructure resilience ORI based on the coupling and aggregation of the target performance indicators (basic capacities) of system operation $RC_{AP}, RC_{AR}, RC_{REC}, RC_{AD}$ subject to the resilience domains and influencing factors for each alternative management strategy can be formally expressed in the following general view:

$$ORI = SS + \lambda \cdot (1 - SS),$$

$$\lambda = \prod_{i=1}^n SR_i, i = \overline{1, n}, n,$$

$$SR_i = \rho_1 \cdot RC_{AP}^i + \rho_2 \cdot RC_{AR}^i + \rho_3 \cdot RC_{REC}^i + \rho_4 \cdot RC_{AD}^i,$$

where ORI is the integral index of the critical infrastructure resilience; SS is the integral index of the critical infrastructure security calculated on the basis of the approach and mathematical models proposed in safety studies [22, 23]; λ is the stability of critical infrastructure to the affects of observable and unobservable factors, i.e., multiple threats (efficiency of system self-preservation and self-recovery); SR_i is the generalized indicator of the critical infrastructure resilience for the i -th resilience domain; n is a number of considered resilience domains for the critical infrastructure under examination; $RC_{AP}^i, RC_{AR}^i, RC_{REC}^i, RC_{AD}^i$ are the aggregated target performance indicators of the system operation calculated for the i -th resilience domain through the expected effects P, S, R from the implementation of the chosen management strategy $rcp \in RCP$; $\rho_j, j = \overline{1, m}$ are the ranks of aggregated target performance indicators of the system operation (the measure of significance of the indicator in terms of targeting and task-setting by a critical infrastructure operator or an security expert/analyst when implementing situational control of the system in specific conditions); m is a number of performance criteria of system operation for given conditions, ranked by the measure of significance (in our case $m = 4$).

The ranks of aggregated target indicators of the system operation performance ρ_j are calculated using the P.C. Fishburn formulation [24]:

$$\rho_j = \frac{2 \cdot (m - j + 1)}{m \cdot (m + 1)}.$$

The computational model of the critical infrastructure (system) prevention capability index is specified by the following formal expressions:

$$RC_{AP} = (P_{AP} + S_{AP}) \times (1 - R_{AP}).$$

System performance at the stage of monitoring and early identification of threats within the resilience management life cycle of critical infrastructure is calculated as follows:

$$P_{AP} = \frac{1}{k_1} \sum_{b=1}^{k_1} p_b,$$

saving rate at this stage:

$$S_{AP} = \frac{1}{k_2} \sum_{g=1}^{k_2} s_g,$$

risk of failures and losses at this stage:

$$R_{AP} = \frac{1}{k_3} \sum_{h=1}^{k_3} r_h = \frac{1}{k_3} \sum_{h=1}^{k_3} (V_h \cdot D_h), \quad r_h = V_h \cdot D_h,$$

where p_b , $b = \overline{1, k_1}$, s_g , $g = \overline{1, k_2}$, r_h , $h = \overline{1, k_3}$ are defuzzified estimates of the indicators $\{IX_1, IX_2, \dots, IX_{k_1}\}$, $\{IX_1, IX_2, \dots, IX_{k_2}\}$, $\{IX_1, IX_2, \dots, IX_{k_3}\} \in IND_{RC_{AP}}$, respectively, obtained at the step when solving the first subproblem; V_h is a probability of risk initiation; D_h is a degree of risk impact (influence) on the effectiveness of the implementation of the system resilience management strategy (V_h and D_h are also assessed by experts when solving the first subproblem); $k^* = k_1 + k_2 + k_3$ is a total number of quantitative and qualitative indicators used to assess the prevention capacity of the critical infrastructure.

Computational estimation models of absorption capacity, responsiveness, recoverability and adaptability indicators have a similar form:

– System absorbability and responsiveness index:

$$RC_{AR} = (P_{AR} + S_{AR}) \times (1 - R_{AR}).$$

System operationability at the stage of initialization, implementation and absorption of threats is calculated as follows: $P_{AR} = \frac{1}{l_1} \sum_{b=1}^{l_1} p_b$.

Resource effect: $S_{AR} = \frac{1}{l_2} \sum_{g=1}^{l_2} s_g$.

Amount of possible damage: $R_{AR} = \frac{1}{l_3} \sum_{h=1}^{l_3} r_h = \frac{1}{l_3} \sum_{h=1}^{l_3} (V_h \cdot D_h)$, $r_h = V_h \cdot D_h$.

p_b , $b = \overline{1, l_1}$, s_g , $g = \overline{1, l_2}$, r_h , $h = \overline{1, l_3}$ are defuzzified estimates of the indicators $\{IX_1, IX_2, \dots, IX_{l_1}\}$, $\{IX_1, IX_2, \dots, IX_{l_2}\}$, $\{IX_1, IX_2, \dots, IX_{l_3}\} \in IND_{RC_{AR}}$, respectively, obtained at the step when solving the first subproblem. $l^* = l_1 + l_2 + l_3$ is a total number of quantitative and qualitative indicators used to assess the absorption and reactive capacity of the system.

– System recoverability index:

$$RC_{REC} = (P_{REC} + S_{REC}) \times (1 - R_{REC}).$$

Functional efficiency of the system operation at the stage of assessment, neutralization and elimination the consequences of threats in the process of functionality restoration: $P_{REC} = \frac{1}{m_1} \sum_{b=1}^{m_1} p_b$.

Cost effectiveness: $S_{REC} = \frac{1}{m_2} \sum_{g=1}^{m_2} s_g$.

Level of loss of system functionality: $R_{REC} = \frac{1}{m_3} \sum_{h=1}^{m_3} r_h = \frac{1}{m_3} \sum_{h=1}^{m_3} (V_h \cdot D_h)$, $r_h = V_h \cdot D_h$.

p_b , $b = \overline{1, m_1}$, s_g , $g = \overline{1, m_2}$, r_h , $h = \overline{1, m_3}$ are defuzzified estimates of the indicators $\{IX_1, IX_2, \dots, IX_{m_1}\}$, $\{IX_1, IX_2, \dots, IX_{m_2}\}$, $\{IX_1, IX_2, \dots, IX_{m_3}\} \in IND_{RC_{REC}}$, respectively, obtained at the step when solving the first subproblem. $m^* = m_1 + m_2 + m_3$ is a total number of quantitative and qualitative indicators used to assess the recovery capacity of the critical infrastructure.

– System adaptability index:

$$RC_{AD} = (P_{AD} + S_{AD}) \times (1 - R_{AD}).$$

Predicted controllability at the stage of mitigation of the damage caused and enhancement of the risk resistance of the system after the occurrence of adverse events: $P_{AD} = \frac{1}{q_1} \sum_{b=1}^{q_1} p_b$.

Resource intensity: $S_{AD} = \frac{1}{q_2} \sum_{g=1}^{q_2} s_g$.

Cumulative effect of system destruction (degradation) probabilities:

$$R_{AD} = \frac{1}{q_3} \sum_{h=1}^{q_3} r_h = \frac{1}{q_3} \sum_{h=1}^{q_3} (V_h \cdot D_h), \quad r_h = V_h \cdot D_h.$$

p_b , $b = \overline{1, q_1}$, s_g , $g = \overline{1, q_2}$, r_h , $h = \overline{1, q_3}$ are defuzzified estimates of the indicators $\{IX_1, IX_2, \dots, IX_{q_1}\}$, $\{IX_1, IX_2, \dots, IX_{q_2}\}$, $\{IX_1, IX_2, \dots, IX_{q_3}\} \in IND_{RC_{AD}}$, respectively, obtained at the step when solving the first sub-problem. $q^* = q_1 + q_2 + q_3$ is a total number of quantitative and qualitative indicators used to assess the adaptive capacity of the system.

When assessing the riskiness of failures or losses origination, it is necessary to take into account risk neutralization measures, e.g., redundancy (duplication), insurance, improvisation, etc.

The integral safety index of critical infrastructure is calculated using the formalism proposed earlier in the study [2]:

$$SS = \frac{1}{RD} \prod_{p=1}^{RD} \left[\frac{1}{l} \prod_{c=1}^l u_c \left[\frac{1}{n} \prod_{i=1}^n v_i \left[\frac{1}{m} \prod_{j=1}^m w_j IX_{cij} \right] \right] \right], \quad \sum_{c=1}^l u_c = \sum_{i=1}^n v_i = \sum_{j=1}^m w_j = 1,$$

where RD is a number of considered resilience domains for the critical infrastructure under examination; IX_{cij} are the estimates of the partial safety indicators of critical infrastructure at levels $(k-2)$, $(k-1)$, (k) , respectively; $l, n, m, \dots$ are the numbers of estimated safety indicators of critical infrastructure at levels $(k-2)$, $(k-1)$, (k) , respectively; $u_c, v_i, w_j, \dots$ are the weights of the partial safety indicators of critical infrastructure agreed upon by experts and determined at levels $(k-2)$, $(k-1)$, (k) , respectively.

The greater the calculated value of the overall resilience index ORI , the more effective the management strategy is considered to ensure its achievement. Based on the results of calculations and comparison of alternatives, such a strategies can be classified as a set of optimal control programs $RCP^* \subset RCP$. At the same time, it should be noted that a strategy is considered effective if it simultaneously provides minimal costs for maintaining system operability and restoring system functions, and also does not cause significant damage to environmental objects in the process of prevention, absorption, development, neutralization of multiple threats and adaptation to new ones operating conditions.

General characteristics, specificity and formal representation of quantitative and qualitative estimation models of the partial resilience indicators of organizational and technical systems, on the basis of which generalized indicators (backbone capacities) of the critical infrastructures operation performance are calculated through the balance correlation of expected effects (performance, saving rate, riskiness) and which are parameters of a unified optimization model of the overall resilience index, will be discussed in detail in the next part of our study: Part 2 (Resilience capacity models and backbone capabilities). The study will be continued in the next submitted article. The manifold of these indicators is given in Table 1 and includes such characteristics as preparedness, reliability, fragility, tensity, cumulated fatigue, vulnerability, maintainability, supportability, feasibility, limits of destruction, safety margin, resistance, segregability, redundancy, coordinability, reconfiguration ability, integrability, autonomy, etc., including permissible errors in measuring system performance characteristics.

Conclusion

Analysis and assessment of system resilience is one of the most responsible and important stages in the control cycle of the soft critical infrastructures security and stability. Defining the applied context of a critical situation, operational data gathering and applying template action plans to neutralize appreciable threats are not enough to ensure effective resilience management and maintain the required (acceptable for specific conditions) level of fault-tolerance of critical infrastructures. Consequently, developed means of adequate information and analytical support for this stage providing optimization of strategic decision-making processes for managing the resilience of critical infrastructures are needed.

For these purposes, an index-based method for the integral estimation of the regional critical infrastructures resilience in the course of the research has been developed. The method is based on the general

conception of resilience and fuzzy set theory, as well as on a combination of soft computing and expertise of the level and ratio of aggregated reliability, safety and stability indices of this class of systems. Based on incomplete initial data the method allows to quantify the systemic risks of the impact of various types of threats on the resilience of critical infrastructure, as well as the useful effects and possible losses, when choosing and implementing anti-crisis measures at the all stages of the life cycle of responding to critical situations taking into account influencing factors.

A distinctive feature of the proposed method is its universality, that is, its applicability to all types of critical infrastructures, both soft and hard. The method allows taking into consideration the imperatives and multi-criteria nature of resilience, uncertainty and high variability of its dynamic characteristics in the process of analysis and assessment at the all stages of the life cycle of system resilience management. This enables operational managers of the situational centers of the region to timely identify critical areas in the operation of infrastructure systems that are most sensitive to local failures and require special attention in terms of monitoring their performance and maintaining protectability in accordance with best security practices and standards.

Other advantages of the method are: the ability to combine both quantitative and qualitative measurements of the system resilience characteristics in one computational estimation model of the integral resilience index, based on the independent expert judgments; the ability to take into account the various significance and antagonistic nature of system resilience indicators and the contribution of each indicator to the aggregated assessment; the ability to rank system resilience indicators depending on the research context, goal-setting, type of resilience, situational factors and class of the system; the inability of manifestation of the "compensation effect", when unacceptable ratings for some indicators can be compensated for by high ratings for other indicators.

The research materials showed that the developed method for integral resilience estimation of critical infrastructures does not contradict the well-known approaches adopted in world practice, but only complements and improves them in terms of flexibility in setting parameters, adaptability to changing conditions and transparency of the assessment procedure, as well as ease of end results interpretation, which so important for practical use.

The novelty of the method lies in the fact that it allows on the basis of fuzzy logic not only to formalize and numerically solve the problem of an integral estimation of the resilience of critical infrastructures based on a set of aggregated quantitative and qualitative indicators of system safety, reliability and stability generally accepted in domestic and foreign standard practices subject to the factors influencing them, but also take into account the multi-aspect matter (multidimensionality), dynamics and uncertainty of these indicators in changing environment.

In practice, the method can be used by system analysts and security experts to prepare design decisions and measures to counter actual threats to the operating of critical infrastructures in conditions of incomplete situational awareness (operational context), inaccuracy of input data and unexpected effects of hidden factors impact on the performance of elements and system in general.

Like for most existing techniques, the bottleneck of the fuzzy-set approach to measuring the integral level of system resilience is that it uses expert judgements. Accordingly, this approach has all the disadvantages characteristic to expert analysis methods, such as: the high cost of organizing a qualified expertise, the error probability due to the narrow-mindedness of experts concerning all aspects of the problem, subjectivity and bias in expert judgments, the difficulty of concordance of expert opinions, the need for a big data and determining the type of membership functions for designing an adequate fuzzy estimation model in some areas, selecting and determining the number of experts. In addition, the accuracy of the results of resilience analysis and measurement, as well as the validity of managerial decisions made on the basis of these results depend on the completeness of the set and decomposability of quantitative and qualitative assessment criteria for estimating the system resilience

The practical value of the research efforts lies in the development of tools for automating resilience analysis and assessment procedures of the critical infrastructures at the initial stages of the life cycle of situational control and response to adverse events. Based on the obtained estimates, guidelines to managers and decision-makers can be generated to improve the specific indicators of system resilience that deviate from standard or specified values. This will also identify strengths and weaknesses in the system resilience both from a technical and organizational point of view.

References

1. Reitan N.K. et al. *Evaluation of resilience concepts applied to critical infrastructure using existing methodologies. IMPROVER Project Report: Deliverable 2.3.* 2016:97.

2. Masloboev A.V. Methodological approach to ensuring the viability of ecological and economic systems of the Russian Arctic (Part 2. Method and evaluation criteria). *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(2):115–126. (In Russ.)
3. Cutter S.L., Burton C.G., Emrich C.T. Disaster Resilience Indicators for Benchmarking Baseline Conditions. *Journal of Homeland Security and Emergency Management*. 2010;7(1):art. 51.
4. Renschler C.S., Frazier A.E., Arendt L.A. et al. *A Framework for Defining and Measuring Resilience at the Community Scale: The P.E.O.P.L.E.S. Resilience Framework. Technical Report No. MCEER-10-0006*. Gaithersburg, MD, U.S. 2010. 106 p.
5. Lee A.V., Vargo J., Seville E. Developing a Tool to Measure and Compare Organisations' Resilience. *Natural Hazards Review*. 2013;14(1):29–41.
6. Bertocchi G., Bologna S., Carducci G. et al. Guidelines for Critical Infrastructures Resilience Evaluation. *AIIC Technical Report. Italian Association of Critical Infrastructures Experts*. 2016:102.
7. Pursiainen C., Rød B., Baker G. et al. Critical infrastructure resilience index. *Proceedings of the 26th European Safety and Reliability Conference*. Glasgow, Scotland: CRC Press, 2017:2183–2190.
8. Petit F.D. et al. *Resilience Measurement Index: An Indicator of Critical Infrastructure Resilience. Report ANL/DIS-13-01. Decision and Information Sciences Division, Argonne National Laboratory, U.S. Department of Energy*. 2013:70.
9. *Australian Government Organisational Resilience HealthCheck – Australian Government Organisational Resilience Good Business Guide*. 2016:30.
10. Hollnagel E. How Resilient Is Your Organisation? An Introduction to the Resilience Analysis Grid (RAG). *Sustainable Transformation: Building a Resilient Organization*. Toronto, Canada. 2010:7.
11. Prior T., Hagmann J. *Measuring Resilience: Benefits and Limitations of Resilience Indices. SKI Focus Report 8*. Zurich: Risk and Resilience Research Group Center for Security Studies (CSS), 2012:26.
12. 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.)
13. Jovanovic A.S., Schmid N., Klimek P., Choudhary A. Use of Indicators for Assessing Resilience of Smart Critical Infrastructures. *IRGC Resource Guide on Resilience*. Lausanne: EPFL International Risk Governance Center, 2016:136–140.
14. Severtsev N.A., Yurkov N.K. *Bezopasnost' dinamicheskikh sistem na etapakh zhiznennogo tsikla = Safety of dynamic systems at life cycle stages*. Penza: Izd-vo PGU, 2023:568. (In Russ.)
15. Pursiainen C. *The Crisis Management Cycle*. UK, London: Routledge, 2017:194.
16. Gareev T.F. Evaluation of the effectiveness of innovations using fuzzy numbers. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta = Bulletin of the Kazan State Agrarian University*. 2008;(4):14–17. (In Russ.)
17. Saaty T.L. *Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process*. Pittsburgh: RWS Publications, 1994:527.
18. Bellman R.E., Zadeh L.A. Decision-making in fuzzy environment. *Management Science*. 1970;17(4):141–164.
19. Bogatkov V.N. et al. *Razrabotka intellektual'nogo upravleniya v mnogourovnevnykh promyshlennykh sistemakh v usloviyakh nepolnoy informatsii na osnove nechetkoy formalizatsii predstavleniy o parametrah tekhnologicheskikh protsessov = Development of intelligent control in multilevel industrial systems in conditions of incomplete information based on fuzzy formalization of ideas about the parameters of technological processes*. Novomoskovsk: RKhTU im. D.I. Mendeleeva, 2022:374. (In Russ.)
20. Yager R.R. Multiple objective decision-making using fuzzy sets. *International Journal of Man-Machine Studies*. 1977;9(4):375–382.
21. Von Neumann J., Morgenstern O. *Theory of Games and Economic Behavior*. Princeton, NJ, USA: Princeton University Press, 1944:625.
22. Masloboev A.V. Technology of modeling and integrated assessment of regional security indicators. *Informatsionno-tekhnologicheskii vestnik = Information Technology Bulletin*. 2020;(1):127–139. (In Russ.)
23. Yurkov N.K., Mikhaylov V.S. *Integral'nye otsenki v teorii nadezhnosti. vvedenie i osnovnye rezul'taty = Integral estimates in reliability theory. introduction and main results*. Moscow: Tekhnosfera, 2020:152. (In Russ.)
24. Fishburn P.C. *Utility Theory for Decision Making*. USA, New York: John Wiley&Sons, 1970:234.

Список литературы

1. Reitan N. K. [et al.]. Evaluation of resilience concepts applied to critical infrastructure using existing methodologies. IMPROVER Project Report: Deliverable 2.3. 2016. 97 p.
2. Маслобоев А. В. Методический подход к обеспечению жизнеспособности эколого-экономических систем российской Арктики (Часть 2. Метод и критерии оценки) // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 115–126.
3. Cutter S. L., Burton C. G., Emrich C. T. Disaster Resilience Indicators for Benchmarking Baseline Conditions // *Journal of Homeland Security and Emergency Management*. 2010. Vol. 7, № 1. Article 51.
4. Renschler C. S., Frazier A. E., Arendt L. A. [et al.]. *A Framework for Defining and Measuring Resilience at the Community Scale: The P.E.O.P.L.E.S. Resilience Framework. Technical Report No. MCEER-10-0006*. Gaithersburg, MD, U.S. 2010. 106 p.

5. Lee A. V., Vargo J., Seville E. Developing a Tool to Measure and Compare Organisations' Resilience // *Natural Hazards Review*. 2013. Vol. 14, № 1. P. 29–41.
6. Bertocchi G., Bologna S., Carducci G. [et al.]. Guidelines for Critical Infrastructures Resilience Evaluation // *AIIC Technical Report*. Italian Association of Critical Infrastructures Experts. 2016. 102 p.
7. Pursiainen C., Rød B., Baker G. [et al.]. Critical infrastructure resilience index // *Proceedings of the 26th European Safety and Reliability Conference*. Glasgow, Scotland : CRC Press, 2017. P. 2183–2190.
8. Petit F. D. [et al.]. Resilience Measurement Index: An Indicator of Critical Infrastructure Resilience. Report ANL/DIS-13-01. Decision and Information Sciences Division, Argonne National Laboratory, U.S. Department of Energy. 2013. 70 p.
9. Australian Government Organisational Resilience HealthCheck – Australian Government Organisational Resilience Good Business Guide. 2016. 30 p.
10. Hollnagel E. How Resilient Is Your Organisation? An Introduction to the Resilience Analysis Grid (RAG) // *Sustainable Transformation: Building a Resilient Organization*. Toronto, Canada. 2010. 7 p.
11. Prior T., Hagmann J. Measuring Resilience: Benefits and Limitations of Resilience Indices. SKI Focus Report 8. Zurich: Risk and Resilience Research Group Center for Security Studies (CSS), 2012. 26 p.
12. 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.
13. Jovanovic A. S., Schmid N., Klimek P., Choudhary A. Use of Indicators for Assessing Resilience of Smart Critical Infrastructures // *IRGC Resource Guide on Resilience* / ed by I. Linkov, M. V. Florin. Lausanne : EPFL International Risk Governance Center, 2016. P. 136–140.
14. Северцев Н. А., Юрков Н. К. Безопасность динамических систем на этапах жизненного цикла. Пенза : Изд-во ПГУ, 2023. 568 с.
15. Pursiainen C. The Crisis Management Cycle. UK, London : Routledge, 2017. 194 p.
16. Гареев Т. Ф. Оценка эффективности инноваций с использованием нечетких чисел // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. 2008. № 4 (10). С. 14–17.
17. Saaty T. L. Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process. Pittsburgh : RWS Publications, 1994. 527 p.
18. Bellman R. E., Zadeh L. A., Decision-making in fuzzy environment // *Management Science*. 1970. Vol. 17, № 4. P. 141–164.
19. В. Н. Богатиков [и др.]. Разработка интеллектуального управления в многоуровневых промышленных системах в условиях неполной информации на основе нечеткой формализации представлений о параметрах технологических процессов. Новомосковск : ПХТУ им. Д. И. Менделеева, 2022. 374 с.
20. Yager R. R. Multiple objective decision-making using fuzzy sets // *International Journal of Man-Machine Studies*. 1977. Vol. 9, № 4. P. 375–382.
21. Von Neumann J., Morgenstern O. Theory of Games and Economic Behavior. Princeton, NJ, USA : Princeton University Press, 1944. 625 p.
22. Маслобоев А. В. Технология моделирования и интегральной оценки показателей региональной безопасности // *Информационно-технологический вестник*. 2020. № 1 (23). С. 127–139.
23. Юрков Н. К., Михайлов В. С. Интегральные оценки в теории надежности. введение и основные результаты. М. : Техносфера, 2020. 152 с.
24. Fishburn P. C. Utility Theory for Decision Making. USA, NY : John Wiley&Sons, 1970. 234 p.

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Владимирович Маслобоев

доктор технических наук, доцент,
ведущий научный сотрудник лаборатории
информационных технологий управления
промышленно-природными системами,
Институт информатики и математического
моделирования имени В. А. Путилова
Федерального исследовательского центра
«Кольский научный центр Российской академии наук»;
главный научный сотрудник лаборатории
природоподобных технологий
и техносферной безопасности Арктики,
Центр наноматериаловедения
Федерального исследовательского центра
«Кольский научный центр Российской академии наук»
(Россия, г. Апатиты, ул. Ферсмана, 14)
E-mail: masloboev@iimm.ru

Andrey V. Masloboev

Doctor of technical sciences, associate professor,
leading researcher of the laboratory of information tech-
nologies for industrial-natural system management,
Putilov Institute for Informatics
and Mathematical Modeling
of the Federal Research Centre "Kola Science Centre
of the Russian Academy of Sciences";
chief researcher of the laboratory of nature-inspired
technologies and environmental safety of the Arctic,
Nanomaterials Research Centre
of the Federal Research Centre "Kola Science Centre
of the Russian Academy of Sciences"
(14 Fersmana street, Apatity, Russia)

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов /
The author declares no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 17.11.2023

Поступила после рецензирования/Revised 10.12.2023

Принята к публикации/Accepted 20.12.2023

ИНФОРМАЦИОННОЛОГИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИКИ ГЕТЕРОСТРУКТУР БЕЗОПАСНОСТИ

О. В. Кузнецова¹, В. А. Шорин², В. Б. Алмаметов³

¹ Лингвистическая гимназия № 6 г. Пензы, Пенза, Россия

^{2,3} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ ov.kuznetsova@mail.ru, ² pnzgu.tpmg@mail.ru, ³ al.valer@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается проблема обеспечения безопасности личности, общества и цивилизации. *Материалы и методы.* Рассмотрены модели динамики гетероструктур, в первую очередь человека. Описаны гетероструктуры мировых цивилизаций. *Результаты и выводы.* Приведены результаты исследований взаимодействий в мегаструктурах природы. Даны модели динамики цивилизации отходов в проблеме безопасности государств. Предложены модели динамики гетероструктур человека, общества цивилизаций в целом как гетерогенной структуры. Оценено взаимодействие в мегаструктурах природы. Созданы модели динамики отходов в проблеме безопасности. Даны модели технологий утилизации отходов, базирующихся на индивидуальном и групповом подходах.

Ключевые слова: безопасность, гетерогенная структура, модели, динамические системы

Для цитирования: Кузнецова О. В., Шорин В. А., Алмаметов В. Б. Информационнологические модели динамики гетероструктур безопасности // Надежность и качество сложных систем. 2024. № 1. С. 142–150. doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-15

INFORMATION AND LOGICAL MODELS OF THE DYNAMICS OF SECURITY HETEROSTRUCTURES

O.V. Kuznetsova¹, V.A. Shorin², V.B. Almametov³

¹ Linguistic Gymnasium № 6 of Penza, Penza, Russia

^{2,3} Penza State University, Penza, Russia

¹ ov.kuznetsova@mail.ru, ² pnzgu.tpmg@mail.ru, ³ al.valer@mail.ru

Abstract. *Background.* The article is devoted to the current problem of ensuring the security of the individual, society and civilization. *Materials and methods.* Models of the dynamics of heterostructures, primarily humans, are considered. The heterostructures of world civilizations are described. *Results and conclusions.* The results of studies of interactions in natural megastructures are presented. Models of the dynamics of waste civilization in the problem of state security are given. Models of the dynamics of human heterostructures and society of civilizations as a whole as a heterogeneous structure are proposed. The interaction in megastructures of nature is assessed. Models of waste dynamics in the safety problem have been created. Models of waste disposal technologies based on individual and group approaches are given.

Keywords: safety, heterogeneous structure, models, dynamic systems

For citation: Kuznetsova O.V., Shorin V.A., Almametov V.B. Information and logical models of the dynamics of security heterostructures. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2024;(1):142–150. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2024-1-15

Введение

Безопасность — состояние защищенности жизненно важных интересов личности, общества и государства от внутренних и внешних угроз. Жизненно важные интересы — совокупность потребностей, удовлетворение которых надежно обеспечивает существование и возможности развития личности, общества, государства [1].

Безопасность системы есть выполнение целевых требований в рамках поставленных задач при текущих ее состояниях с учетом рисков и в управлении компетентными лицами, обеспеченными достоверной информацией. Критерии безопасности всегда статистически вероятностные: текущее

состояние системы, рисковая ситуация, компетентная подготовка управления системой, обеспечение управления достоверной информацией.

Модели безопасности базируются на системологических исследованиях безопасности функционирования, методологии исследований рисков, математических методах оценки безопасности в процессе работы в окружающей среде, методах подготовки управленцев к безопасной эксплуатации, информационном обеспечении безопасности, геометрическом программировании, методах принятия решений в сложных условиях.

Теория безопасности не может исходить только из кратности явлений, имеющих опасные последствия, для гибели системы достаточно создание одной катастрофической ситуации.

Модели динамики гетероструктур

В настоящее время в научном сообществе достигнуто понимание острой необходимости учета гетерогенности современной цивилизации.

Гетерогенными, по своей глубинной сущности, являются все компоненты цивилизации – страны, народы, экономики, культуры и другие, не только между собой, но и внутри каждого компонента. Эволюция материальных и духовных объектов неизбежно ведет к усилению гетерогенности их структур. Наконец, сам человек представляет собой сложнейшую гетерогенную систему с растущим множеством подвидов *homo sapiens*.

Становление и развитие цифровой цивилизации создало принципиально новую проблему взаимодействий в гетероструктуре человек-компьютер, а это, в свою очередь, поставило множество задач в понимании гибридного интеллекта, создании надежных мегасистем, преодолении барьеров на пути от *homo sapiens* к *homo intellectus* и бесконфликтному миру без катастроф и заблуждений прошлого.

Среди концептуальных моделей гибридного интеллекта выделяют:

- модели, включающие естественный интеллект человека и искусственный компьютерный интеллект;
- модели последовательные, параллельные, смешанные;
- модели, содержащие нейросетевые, генетические, статистические и другие алгоритмы;
- модели, базирующиеся на групповом интеллекте экспертов и искусственном интеллекте;
- модели, рассчитанные на специальные применения – разработки торговых роботов, финансовых прогнозов, системной футурологии и пр.;
- адаптивные системные модели динамики, включающие алгоритмы и программы искусственного интеллекта, ориентированные на конкретного человека вкупе с интеллектом этого человека и групповым интеллектом экспертов по конкретной проблематике [2].

Наряду с фон-неймановской архитектурой программ и моделей со строгим следованием заданному алгоритму используется множество других архитектур: гарвардская, использующая раздельную память для исполняемого кода и данных и позволяющая вносить модификации в саму себя, мутируя таким образом; нейросетевая и другие с внесением человеческих качеств, таких как компетентность и здоровье.

Системный анализ моделей гибридного интеллекта позволяет утверждать, что определяющим в успешности применения той или иной модели является интеллект человека, применяющего ту или иную модель.

Проблема понимания процессов образования человеческого интеллекта представляет собой одну из важнейших проблем современных науки и образования.

Под интеллектом в настоящее время понимают совокупность умственных функций, которые превращают восприятие в новые знания по некоторому генетически наследуемому и социально выстроенному алгоритму.

Несомненное лидерство в экономике и политике принадлежит странам и территориям с преимущественным развитием методов гибридного интеллекта интеллектуального капитала и технологических инноваций. Дело в том, что интеллект в отличие от материальных активов и ресурсов неисчерпаем: чем более интенсивно государство, регион, индивид употребляют интеллект в деле, тем быстрее и масштабнее интеллект возрастает.

Главными показателями интеллекта являются умение решать задачи, задаваемые окружающей действительностью, доведение решения задачи до реализации интеллектуального продукта и получение экономического эффекта от реализации в гетерогенной конкурентной среде [3].

Вероятно, самой актуальной проблемой XXI в. является проблема безопасности социотехнической сферы как результата жизнедеятельности населения Земли. А в центре этой проблемы – безопасность человека. В связи с чем рассмотрен процесс трансформации человека как биовида и основные угрозы для человечества: воздействие внешних возмущений из космического пространства, нежелание человека заботиться о своем собственном здоровье через самоконтроль основных предикторов.

Трансформация человека и социотехносферы – многовековой сложнейший процесс зарождения и гибели гетероструктур. Считается, что современный физический биовид человека сформировался около 50 тыс. лет назад и с тех пор развивался сам и создавал способы и средства выживания, а также орудия облегчения своего труда, саморазвиваясь в приобретении знаний, умений, навыков [4].

С позиций генетики биовид *homo sapiens* включал бесконечное множество людей с разнообразными качествами. Во все времена рождались люди генетически, а не воспитанием и самовоспитанием созданные выдающимися. Например, индийский принц – просветленный, стал Буддой, основоположником буддизма; Александр Македонский – родился великим полководцем; мессия Иерусалима Иисус Христос – чудотворец, миротворец, распятый римлянами и др. Как известно, эволюция животного – путь видовой специализации, связанной с занятием тем или иным видом своей особенной ниши, устраняющей конкуренцию с другими видами. Основной путь биологической эволюции у *homo sapiens* заключается в специализации конкурентной борьбы. Использование методологии интеллекта для определения эволюционной цепочки видов человека позволило выдвинуть гипотезу о массовой трансформации в настоящее время человека через древние подвиды *homo habilis* и *homo erectus* к кроманьонцам и далее – *homo sapiens*, *faber*, *stepitans*, *ludens*, *creators*, *symbol analyst*, *informatikus*, *contrjilis*, *solis*, *kibernetik organon*, *posthuman gumanistics* и чисто футуристической формы *homo immortalis omnipotent* в реально создающей новую социотехносферу – *homo intellectus*.

Выдвинутая гипотеза весьма убедительно подтверждается анализом исследований ученых многих специальностей: генетиков, антропологов, биологов, философов, психологов, социологов, инженеров и др. Доля физического труда повсеместно уменьшается при неуклонном увеличении доли умственного труда. Постиндустриальное общество превращается в цифровую цивилизацию, отдельные государства через процессы глобализации превращаются в единую социотехнологическую сферу.

Основной гетероструктурой человеческого организма, определяющей нормальное функционирование всех систем, является интегративная метасистема кровообращения, включающая мозг, сердце, сосуды, кровь, а также лимфатическую, эндокринную и нервную системы. Кровообращение представляет собой сверхсложную MSS с гетерогенной структурой и нейрогуморальным регулированием функционирования. Нарушения в ней приводят к рассинхронизации всех систем, болезням сердца, сосудов, головного мозга.

Заболееваемость сердца и сосудов превратилась в главную проблему для большинства населения земли, что однозначно связывается с умственной деятельностью. Доказано стимулирующее влияние гибридного интеллекта на процессы развития социотехносферы XXI в., особенно усилившееся во второй половине XX в. после создания микрочипов, системных программ анализа и моделирования умственных процессов.

Компьютер, *INTERNET*, средства коммуникации коренным образом изменили жизнь, обеспечивая человека бесконечными возможностями повышения собственного интеллекта и превращения индивидуального интеллекта в гибридный с информационной базой мирового интеллекта. Психика человека далеко не всегда подготовлена к этому и реагирует обострением системных противоречий с социотехносферой, человека с человеком и человека с самим собой. Особую роль играют противоречия человека с самим собой, поскольку именно они ведут к разрушению гармонии жизни, складывающуюся, как правило, к 30-летнему возрасту. Разрушение гармонии жизни приводит к дисбалансам душевного равновесия, кардионеврозам, нарушениям в сердечно-сосудистой системе, инфарктам и инсультам. Частота инфарктов и инсультов с возрастом от 30 до 50 лет возрастает в 100 раз, для людей старше 50 лет – почти 90 % от общей летальности. По официальным данным ООН в XXI в. в среднем за год умирает около 30 млн человек. При этом с каждым годом процент умерших от инфарктов и инсультов в общей смертности прирастает от 60 до 70 % по разным регионам мира.

Основная проблема сердечно-сосудистых заболеваний (ССЗ) по результатам системного анализа проблемы, проведенного на основе анализа информации о сердечно-сосудистых катастрофах (ССК), моделировании процессов, приводящих к ССК и инструментального исследования ССК, заключается во временных запаздываниях с медицинской помощью и разрывах в функционировании в цепи обратной связи динамики гетероструктур. Известный «золотой час» для диагностики и медицинской помощи при ССК практически далеко не всегда выполняется. Запаздывание в неотложной медицинской помощи невозможно устранить, поскольку существует и действует закон инерции.

Разрыв в цепи обратной связи динамики гетероструктур интегративной метасистемы кровообращения принципиально могут быть устранены в рамках регулярного самоконтроля основных предикторов ССК и принятия своевременных мер по снижению динамической неустойчивости за счет медикаментозных, диетологических и других стабилизирующих мероприятий по достижению целых показателей.

Обобщенные результаты интеллектуального анализа проблемы сформулированы следующим образом. Основной системой человеческого организма, определяющей нормальное функционирование всех систем, является интегративная метасистема кровообращения, включающая мозг, сердце, сосуды, кровь, а также лимфатическую, эндокринную и нервную системы. Метасистема представляет собой сверхсложную (MSS) с гетерогенной структурой и нейрогуморальным регулированием функционирования. Нарушения в ней приводят к рассинхронизации всех систем, болезням сердца и головного мозга, заканчивающихся инсультом или инфарктом миокарда.

Работу нервной системы обеспечивают около 20 млрд специальных клеток – нейронов самых разных гетерогенных структур. Каждый нейрон устанавливает около 7 тыс. прямых и неопосредствованных связей с соседями. В головном мозге сосредоточено 70 % всех нейронов, остальные расположены в спинном мозге.

За основные интеллектуальные функции в мозге «отвечает» интерпретационная кора, расположенная на стыке лобной, височной и теменной долей мозга.

Головной мозг новорожденного содержит около 10 млрд нейронов, к 16 годам у человека завершается формирование головного мозга, и он содержит около 14 млрд нейронов. В дальнейшем происходит в целом необратимый процесс гибели нейронов, так в 20 лет человек теряет около 10 тыс. нейронов в сутки, в 40 лет – 50 тыс. нейронов, к 60 годам – 70 тыс. нейронов, а вес головного мозга к этому времени уменьшается на 18...22 %. Такова общая динамика гетерогенных структур мозга.

С этим в целом соотносятся результаты исследований динамики основных интеллектуальных функций.

Процесс коммуникации осуществляется с помощью слов и понятий, языка и текстов; понимание, интерпретация информации реализуются Я-интеллектом индивида. Структура интеллекта человека, с позиций информационно-логического понимания интеллекта, представляет собой гетерогенную структуру, основным элементом которой считается сознание. Сознание определяет смысл и цель жизни, а также потребности, интересы и ценности жизни человека и его деятельности, реализуя их через конкретные алгоритмы, одним из многочисленных пониманий интеллекта человека является понимание того, что алгоритм достижения конкретной цели и есть интеллект.

Гетероструктуры цивилизаций

В настоящее время в рамках «глобальной» цивилизации существует около 220 разных стран с гетерогенными природными условиями, языками, культурой и прочим, которые объединяются в «локальные» цивилизации с разными понятиями, что такое человек, семья, способности, потребности, знания, интересы, воля; орудия труда, энергия, ресурсы, технологии, благосостояние людей, воспроизводство, обмен, управление, социально-политические отношения, образование, наука, религия, мораль, культура и пр. [5].

Традиционно выделяют Западную, Азиатскую и Восточную цивилизации. Западная цивилизация с ее идеалом всеобщей истины, отделенной от исторических культур, не может претендовать на безусловную всемирность. Это надисторическое начало в силу известных обстоятельств представлено, в первую очередь, англо-саксонской цивилизацией с ее главным приоритетом «обмани ближнего, но заработай как можно больше». Западные «локальные» цивилизации воюют, вводят экономические санкции во имя золотого тельца. Исторические цивилизации Азии и Востока занимаются условиями диалога, модальностью и тоном, формирующими определенный тип отношений. Восток имеет свою культуру диалога, риторика на Востоке заменяет искусство манипулирования другими. Коммуникация на Востоке всегда имеет стратегическую природу и разделяет людей на властвующих и подчиненных. Искреннюю любовь китайцев к лозунгам и призывам или тот факт, что акцент китайского руководства на самобытности и «совокупной силе» своей цивилизации не переходит в идейный национализм западного образца. Природа власти на Востоке помогает рассеять многие недоумения, связанные с представлением о культуре как о неизменной сущности. Ничто не мешает японцам, наделенным исключительно сильным чувством национального достоинства и уникальности, перенимать

достижения западной цивилизации. Западная свобода выбора и восточная свобода действия могут быть совмещены, как они были когда-то соединены в личности Бога.

Гетероструктуры цивилизации в разных науках различаются существенными характеристиками весьма существенно.

В системологии в понятии «цивилизация» вкладывается множество смыслов, в некоторых научных школах несколько десятков смыслов.

Историки считают основными пять смыслов «локальных» цивилизаций – природные условия, языковое родство, близость политических и экономических устоев, культура, менталитет. В более подробном изложении «локальные» цивилизации, на наш взгляд, могут быть классифицированы по главному смыслу – человеку и его роли: человек, семья, способности, потребности, знания, интересы, воля; технологический способ производства – орудия труда, энергия, ресурсы, технологии; экономика – благосостояние людей, воспроизводство, обмен, управление; социально-политические отношения – народ, власть, право; духовный мир – образование, наука, религия, мораль, культура.

В социологии принято считать следующие восемь гетероструктур цивилизации: западная, китайская, исламская, индуистская, латиноамериканская, африканская, православная, японская.

Материковая классификация цивилизаций предполагает пять материков: Евразия – 54,6 млн км², 94 страны; Африка – 30,3 млн км², 62 страны; Северная Америка – 24,4 млн км²; Южная Америка – 17,8 млн км²; Австралия – 7,7 млн км².

Региональная классификация включает: Северную Европу, Южную Европу, Центральную Европу, Россию, Ближний Восток и Персидский залив, Индостан, Центральную и Восточную Азию, Юго-Восточную Азию, Австралию и Океанию, Северную и Центральную Америки, Государства Карибского моря, Южную Америку, Северную и Восточную Африки, Западную Африку, Центральную Африку, Южную Африку. Всего 16 регионов и 220 стран.

По абсолютному показателю ВВП первые 12 стран мира: США – 19,5 трлн. долларов; КНР – 12,2; Япония – 4,5; Германия – 3,6; Англия – 2,8; Франция – 2,5; Индия – 2,49; Италия – 1,9; Бразилия – 1,5; Канада – 1,5; Южная Корея – 1,38; Россия – 1,3.

По ВВП на душу населения богатейшие страны: Катар, Сингапур, Норвегия, Бруней, ОАЭ, США, Гонконг, Швейцария. Беднейшие страны: Мозамбик, Гвинея, Нигер, Молави, Бурунди, Либерия, Конго, ЦАР.

Системный анализ различных показателей конкурентоспособности по данным ООН позволил выявить основные смыслы классификации гетероструктур земной цивилизации с объективными оценками перспективности той или иной локальной цивилизации в формах отношений дохода к прожиточному минимуму беднейшей части населения и процента беднейшего слоя к общей численности, а также *future*-коэффициента как отношение доли населения к валовому мировому продукту: Япония – 0,12, Западная – 0,25, Восточно-Европейская – 1,2, Исламская – 1,4, Конфуцианская – 1,6, Латиноамериканская – 1,6, Индуистская – 5,7.

По результатам новейших исследований индексы прогрессивности и надежности «локальных» цивилизаций в форме трех основных индексов для социально-экономических гетероструктур, с учетом реальных интегральных характеристик «локальных» цивилизаций, выстраиваются следующим образом: русская, китайская, индуистская, исламская, латиноамериканская, японская, африканская, западная.

В истории мировой цивилизации существенное место занимает история военных конфликтов и применения вооружений: известна Куликовская битва в XIV в., разгром Тевтонского ордена в XV в., войны в Европе в XVI в., Всеевропейская тридцатилетняя (1618–1648 гг.) война в XVII в., Северная 20-летняя война, Испанская 13-летняя и множество других в XVIII в.

Начиная с рабовладельческого строя военные конфликты и войны постоянно сопровождают человеческое общество. Различают два типа конфликтов – между государствами и восстания угнетенных социальных слоев. В вооруженных конфликтах в античную эпоху погибли более 100 тыс. человек в интересах рабовладельцев. В середине века феодальные войны преследовали цель захвата земель и людей для господствующих классов. Раздел мира между капиталистическими государствами в конце XIX в. привел к Мировой войне 1914–1918 гг., число убитых и раненых составило более 10 млн человек, стоимость войны – более 400 млрд долл. В этой войне наряду с традиционными вооружениями применялись танки, самолеты, бронепоезда и, самое главное – новое оружие массового поражения – отравляющие вещества.

1929–1933 гг. в истории известны как мировой финансовый кризис, а в США как «Великая депрессия». Считается, что причиной кризиса являются: концентрация банковского капитала, нехватка

долларовой массы, расслоение населения, системный упадок рыночной экономики и либеральной демократии, биржевые махинации, огромные военные заказы и, главное, замедление развития биовиды *homo sapiens*. Все это привело ко Второй мировой войне 1939–1945 гг., в которой погибло 55 млн человек с общими затратами более 4 трлн долл. Впервые применено ядерное оружие против Японии (Хиросима, Нагасаки).

Взаимодействия в мегаструктурах природы

Землетрясения были одной из главных проблем человечества во все времена. Никто не знает точно, сколько землетрясений на самом деле происходит на Земле. Ежегодно приборами регистрируется более миллиона землетрясений. Рост количества пунктов наблюдений и совершенствование приборов для записи сейсмических колебаний позволили регистрировать с каждым десятилетием все больше землетрясений, происходящих в недрах планеты. Необходимую информацию для изучения реализации вопросов сейсмостойкости представляют, естественно, данные о самом землетрясении.

Считается, что наиболее вероятными районами землетрясений и вулканической активности и других катастроф являются границы литосферных плит, а если точнее – очертания литосферных плит, установленные по расположению вулканов и фиксируемых землетрясений.

В то же время известно, что большая часть катастроф – 80 % происходит вдоль побережий бассейна Тихого океана, 15 % – в восточной части Средиземного моря и на юге Азии, 5 % – в разных других регионах. По результатам наших исследований, из 180 стран на Земном шаре катастрофы более или менее регулярно происходят в 33 странах, а наиболее разрушительные – в Армении, Гаити, Индии, Пакистане, Турции, Ямайке, Японии.

Обеспечение надежности атомных электрических станций – важнейшая проблема современной цивилизации. Несмотря на серьезные усилия ученых и инженеров различных стран в области традиционных и возобновляемых источников энергии, атомная энергетика по-прежнему, как и в прошлом веке, является одним из наилучших и наиболее перспективных путей обеспечения человеческого общества электрической энергией. События последних лет, особенно катастрофа на прибрежных атомных станциях Фукусимы в Японии 11 марта 2011 г. побуждает искать новые пути обеспечения надежности АЭС. Совершенно очевидно, что при проектировании станций необходимо учитывать комплексное влияние природных катастроф на надежность станций, в частности, землетрясений и цунами, вызываемых, по результатам исследований, внешними силами – бомбардировкой земной поверхности космическими объектами.

Прибрежная атомная станция Фукусима-1, построенная 40 лет назад американской компанией «General Electric», была затоплена цунами и взорвалась, пострадали все четыре ядерных реактора, а также один реактор АЭС Фукусима-2. Главной причиной катастрофы АЭС японские специалисты и сотрудники МАГАТЭ считают обесточивание насосов для охлаждения реактора вследствие затопления помещений мощной волной – цунами высотой до 30 м. Центром USGS – ООН отмечается аварийная остановка станции при землетрясении 7 магнитуд в 1996 г. Япония находится на стыке трех литосферных плит. На Японских островах ежегодно регистрируется до 1,5 тыс. землетрясений, большинство из которых весьма слабые.

В атмосферу Земли ежедневно врзается свыше 50 тонн метеоров самых разных размеров со скоростью 30...90 км/с. Около 500 метеоритов более 1 см в поперечнике – «чертовы пальцы» – достигают поверхности Земли.

Метеорит, упавший в Аризоне, оставил воронку диаметром 1,2 км и глубиной 170 м. Космический объект диаметром 10 км упал на полуостров Юкатан в Мексике, расплавленные куски пород разлетелись на тысячи километров. Гигантские волны высотой около 1 км смыли все на Земле. Возможно, в результате этой катастрофы и вымерли динозавры.

На дне моря Беллинсгаузена у южного побережья Чили обнаружена кратерная структура от астероида диаметром в 1 км на глубине 5 км, эта астроблема известна под названием «Элтанин». В Набии обнаружена астроблема Гоба, масса метеорита равна 60 т. Под песками пустыни Калахари (Мороквенг) обнаружена астроблема диаметром около 120 км.

Астроблема «Санбери» в провинции Онтарио (Канада) имеет под кратером стекловидное тело оплавленных при ударе метеорита пород мощностью около 1 км. Некоторые ученые считают астроблемой Приаральскую кольцевую структуру диаметром 700 км. Всего на Земле обнаружено и изучено более 1500 астроблем.

Большие лунные кратеры имеют глубину до километра при диаметре 200 км и разную структуру: террасированную, лучевую, концентрическую, что, видимо, связано со скоростью, массой и траекторией движения космических объектов.

Рассмотрение и анализ характеристик плотности, твердости и прочности пород земной поверхности позволяет выдвинуть гипотезу о моделях бомбардировки Земли космическими объектами.

Первая модель бомбардировки – это бомбардировка относительно небольшими по массе каменными метеоритами со скоростями, существенно погашенными в атмосфере Земли, углами атаки от 30 до 90°, падающими в воду или в горах на твердые породы, а также в пустынях на песок или щебень. По этой модели возникают небольшие по мощности разрушения, и таких случаев – подавляющее большинство.

Вторая модель бомбардировки – метеоритами с количеством движения, вызывающим при ударе о землю разрушение метеорита, или попадание в песок, гравий и т.п. Это модель с диссипацией энергии в зоне контакта метеорита с землей. Математическое моделирование на численно-аналитической модели сверхскоростных взаимодействий показывает, что бомбардировка АЭС по этой модели также безопасна для защитного купола реактора при прямом попадании до значений количества движения, равных или меньших 0,43 т·км/с.

Третья модель бомбардировки – метеоритами с количеством движения, большим 0,43 т·км/с, опасными для прямого попадания в защитный купол реактора, а также опасными для кинематических возмущений поверхности в ближайшей зоне от реактора АЭС. Другой класс моделей бомбардировки поверхности Земли космическими объектами описывает диссипативное ударное взаимодействие объектов с водой, гранитом, песком, различными почвами.

Таким образом, землетрясения, по выдвинутой гипотезе, с учетом предлагаемых моделей бомбардировки в большинстве случаев связаны с бомбардировкой Земли космическими объектами.

Интеллектуальный анализ данных о землетрясениях позволяет утверждать, что повышение надежности АЭС с использованием методов защиты реакторов от бомбардировки космическими объектами – реальный путь развития атомной энергетики.

Модели динамики отходов в проблеме безопасности

Рост численности населения Земли всегда вызывал проблемы обеспечения людей едой и временно утилизацией продуктов жизнедеятельности. Развитие городских поселений вызвало к жизни развитие всевозможных ремесел, обеспечение горожан продовольствием и утилизацию продуктов жизнедеятельности, включая отходы производства. Дальнейшие цивилизационные преобразования относятся к эволюции человеческих сообществ: появлению науки, образования, медицины и пр.

Исторически в России сложилось практичное отношение к отходам жизнедеятельности – отхожие места совмещались с местами органических отходов. Металл и макулатуру собирали пионеры, старую одежду, обувь собирали старьевщики, дерево сжигалось в печах, стекло сдавалось в пункты приема тары. Пластмассовых отходов до 70-х гг. прошлого века практически не было.

В настоящее время сложилась престранная ситуация именно с пластиковыми отходами, особенно с пластиковой тарой, особенно в странах на побережье Атлантики.

Как всегда так называемые «инновации» Запада распространяются по всему миру и всюду приводят к умноженным на благоглупости так называемых элит с их жадностью к обогащению, экологическим, экономическим, социальным и прочим катастрофам.

Только бытовых отходов произведено в 2022 г. 1,7 млрд т, к 2025 г. прогнозируется 2,2 млрд т. Главный «мусорщик» в мире – США – 20 %.

Утилизируемые отходы представляют собой серьезный источник загрязнения, значительная часть твердых коммунальных отходов не могут быть превращены в полезные вещества, а распространенная технология утилизации отходов на мусоросжигательных заводах является экологической проблемой [6].

Проблема обусловлена недостаточной изученностью моделей и технологий утилизации отходов сельскохозяйственных производств.

Утилизация – это «употребление с пользой» отходов. Она представляет собой комплекс мероприятий, направленных на сбор, транспортирование, сортировку и переработку отходов.

Создать абсолютно экологически чистую, безотходную технологию утилизации весьма проблематично.

Практически используются технологии захоронения, сжигания, нейтрализации отходов. Захоронение опасных отходов производят на месте образования для уменьшения риска загрязнения окружающей среды. Общий объем отходов, подлежащих захоронению, составляет около 30...35 % от общей массы.

В настоящее время основными технологиями утилизации являются захоронения, компостирования, термические, рециклинг, плазменные [6].

Технология захоронения – один из самых распространенных способов, но этот метод распространен лишь на несгораемые отходы, а также такие, которые могут выделять токсичные элементы в процессе горения. Полигоны для захоронения оснащены современными инженерными сооружениями, позволяющими изолировать вредные вещества.

Однако проблема экологии остается, так как продукты распада отходов, попадающие в грунтовые воды, разносятся последними на многие километры от места захоронения, вызывая отравления сельскохозяйственных земель. Растения вместе с грунтовыми водами, поглощая эти продукты распада, накапливают химикаты в корнеплодах, фруктах и овощах, которые затем, попадая на стол к потребителю, отравляют человеческий организм.

Технология утилизации отходов компостированием позволяет утилизировать отходы путем естественного биологического разложения; компостирование снабжает сельские хозяйства полезными для почвы удобрениями, позволяющими нормализовать баланс минералов в земле.

Технология утилизации способом сжигания считается безотходной, так как отходы превращаются в золу, которая используется для изготовления минеральных удобрений, стройматериалов и пр. В сельском хозяйстве энергия сжигания используется для обогрева теплиц.

Плазменная переработка отходов – технология высокотемпературной газификации, позволяющая получать электроэнергию.

Модели технологий утилизации отходов базируются на индивидуальном и групповом подходах: мусор собирается в пластиковые пакеты, по мере заполнения пакеты либо выставляются у домовладений, либо выносятся в контейнеры у многоэтажек или в мусоропроводы. Далее мусор отвозится для захоронения на полигон или на сортировку с последующим компостированием, сжиганием.

Вместе с тем утилизация пищевых отходов в частных домовладениях реализуется по технологиям компостирования и сжигания на месте с использованием мусоросжигательных заводов. Большинство стран Западной Европы сжигают 30...50 % отходов (Дания – 54 %, Швеция – 49 %, Нидерланды – 39 %, Германия – 38 %); в Японии сжигается 75 % отходов. В Великобритании функционируют 28 мусоросжигательных заводов, планируется и строится 12 заводов в Англии, Шотландии и Уэльсе. Следует отметить бесперспективность этих технологий, так как продукты горения существенно влияют на структуру воздуха и потепление климата [7].

Исходя из практики разных стран, проблема безопасности и управления отходами должна решаться на местах, внутри региона накопления отходов.

Список литературы

1. Северцев Н. А., Юрков Н. К. Безопасность динамических систем : монография. Пенза : Изд-во ПГУ, 2023. 568 с.
2. Смопут М. Гетероструктуры компьютерной цивилизации : монография. Пенза : Центр, 2019. 99 с.
3. Юрков Н. К., Кузнецов Н. С., Смогунов В. В. Инженерия алгоритмов и моделей наноразрушений гетероструктур // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2013. С. 10–20.
4. Кузнецов Н. С., Смогунов В. В., Фионова Л. Р., Юрков Н. К. Гибридный интеллект инженерии гетероструктур вычислительной техники // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. С. 85–97.
5. Смогунов В. В., Кузнецов Н. С. Гетерология Mgaseince system // Инфокоммуникационные технологии. 2022. № 78. С. 80–89.
6. Смогунов В. В. Гетерология технологий утилизации отходов // Нива Поволжья. 2020. № 4 (57). С. 140–146.
7. Смогунов В. В., Кузнецова О. В., Якимов А. Н. Динамика гетерогенных структур. Германия : Academic Press, 2013. 106 с.

References

1. Severtsev N.A., Yurkov N.K. *Bezopasnost' dinamicheskikh sistem: monografiya = Safety of dynamic systems : monograph*. Penza: Izd-vo PGU, 2023:568. (In Russ.)
2. Smoput M. *Geterostruktury komp'yuternoy tsivilizatsii: monografiya = Heterostructures of computer civilization: monograph*. Penza: Tsentr, 2019:99. (In Russ.)

3. Yurkov N.K., Kuznetsov N.S., Smogunov V.V. Engineering of algorithms and models of nanostructures of heterostructures. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2013:10–20. (In Russ.)
4. Kuznetsov N.S., Smogunov V.V., Fionova L.R., Yurkov N.K. Hybrid intelligence of engineering of heterostructures of computer technology. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2018:85–97. (In Russ.)
5. Smogunov V.V., Kuznetsov N.S. Heterology of the Mgaseince system. *Infokommunikatsionnye tekhnologii = Information communication technologies*. 2022;(78):80–89.
6. Smogunov V.V. Heterology of waste disposal technologies. *Niva Povolzh'ya = Niva of the Volga region*. 2020;(4): 140–146. (In Russ.)
7. Smogunov V.V., Kuznetsova O.V., Yakimov A.N. *Dinamika geterogennykh struktur = Dynamics of heterogeneous structures*. Germaniya: Academic Press, 2013:106. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Оксана Владимировна Кузнецова

кандидат педагогических наук,
учитель английского языка,
Лингвистическая гимназия № 6 г. Пензы
(Россия, г. Пенза, Заводское шоссе, 1)
E-mail: ov.kuznetsova@mail.ru

Владимир Алексеевич Шорин

кандидат технических наук,
доцент кафедры теоретической
и прикладной механики и графики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: pnzgu.tpmg@mail.ru

Валерий Борисович Алмаметов

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

Oksana V. Kuznetsova

Candidate of pedagogical sciences, english teacher,
Linguistic Gymnasium № 6 of Penza
(1 Zavodskoe highway, Penza, Russia)

Vladimir A. Shorin

Candidate of technical sciences, associate professor
of the sub-department of theoretical
and applied mechanics and graphics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Valery B. Almametov

Candidate of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department of design
and production of radio equipment,
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 20.11.2023

Поступила после рецензирования/Revised 13.12.2023

Принята к публикации/Accepted 23.12.2023

ДАЙДЖЕСТ СТАТЕЙ ЗА 2023 г.
(краткий обзор публикаций научного журнала
«Надежность и качество сложных систем»)

Валентин Васильевич Миронов, д.ф.-м.н, профессор

Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина

Журнал «Надежность и качество сложных систем» представляет научные исследования в области надежности и качества сложных систем. Научный интерес журнала охватывает широкий спектр проблем теории надежности и качества систем. Приоритетной задачей журнала является также развитие международного сотрудничества в области теории надежности и управления качеством,

Приведем краткое содержание (дайджест) статей за 2023 г. в соответствии с рубриками журнала.

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

№ 1 (41)

О. Н. Пчельникова-Громова

Повышение качества продукции на основе системы функционально-стоимостного анализа

Рассматривается задача повышения эффективности производства и качества продукции, использующих функционально-стоимостной анализ, главную роль отводят стоимостной оценке бизнес-процессов.

О. В. Абрамов

Некоторые решения проблемы управления техногенными рисками

Рассмотрена задача управления техногенными рисками сложных систем ответственного назначения. Основное внимание уделено синтезу стратегии управления техногенными рисками на основе принципа гарантированного результата и с использованием идей функционально-параметрического направления теории надежности.

Г. И. Коршунов

Моделирование физических сред для оптимизации цифрового управления в киберфизических системах

Рассмотрены модели физических сред для оптимизации цифрового управления в киберфизических системах, ориентированные на уровни целей в проблемной области. Рассматриваемый подход существенно облегчается применением программных средств Python.

*Е. М. Волотов, Т. А. Волотова,
И. В. Митрофанов, Е. И. Митрофанов*

Модель погрешности определения параметров траектории при использовании системы регистрации на базе видеокамер общего назначения

Рассмотрена задача создания модели погрешности, учитывающей все факторы, влияющие на точность определения параметров траектории. Выделены три составляющие этого процесса – регистрацию, технологические линии обработки и методы, алгоритмы и программы.

№ 2 (42)

*В. В. Головкин, О. М. Батищева,
В. А. Папшев*

Исследование формирования напряженно-деформированного состояния поверхностного слоя резбовых деталей в условиях нарезания резьбы с ультразвуковыми колебаниями

Предложен способ и специальные ультразвуковые устройства, повышающие эффективность технологического процесса нарезания резьбы с учетом особенностей процесса обработки.

*А. А. Громов, Ю. В. Чебурков,
А. И. Годунов, Н. К. Юрков*

**Моделирование элементов системы
«стрелковое оружие – ствол – пуля»
с использованием метода
конечных элементов**

Решена задача повышения эффективности индивидуального стрелкового оружия. Рассмотрен порядок проведения моделирования с целью оптимизации и выбора оптимальных технических характеристик с помощью программных комплексов системы автоматизированного проектирования элементов системы «стрелковое оружие – ствол – пуля» с использованием метода конечных элементов.

И. Е. Старостин, А. А. Дружинин
**Аналитическое приближение решений
уравнений метода математического
прототипирования энергетических процессов
путем качественного анализа этих уравнений**

Предложен метод математического прототипирования энергетических процессов, позволяющих строить адекватные математические модели динамики физических и химических процессов различной природы.

*Е. А. Пафилов, А. И. Годунов,
Н. К. Юрков, О. В. Николаев*
**Алгоритмы адаптивного обнаружения
сигнала, отраженного от малоразмерных
наземных целей**

Решена проблема селекции неподвижных и малоподвижных МНЦ при использовании поляризационных и поляризационно-дальномерных портретов и созданных на их основе алгоритмов адаптивного обнаружения сигнала.

И. М. Рыбаков
**Модели и методы измерения
электрических параметров
в сложных системах электроники**

Выполнено проектирование сложной системы электронной аппаратуры. Используются относительно простые модели в современные САПР, предназначенные для проектирования электронных устройств.

№ 3 (43)

*В. А. Острейковский, А. В. Сорочкин,
Н. К. Юрков*
**Развитие методов теории живучести
в задачах долговечности структурно
и функционально сложных динамических
систем с длительными сроками активного
существования**

Рассмотрены задачи повышения конструктивной сложности и одновременного обеспечения высокого качества сложных, критически важных систем. Для решения задачи использованы современные математические и конструктивные методы и подходы к оценке показателей их долговечности и живучести.

*М. Ю. Михеев, О. В. Прокофьев,
А. Е. Савочкин, И. Ю. Семочкина*
**Обеспечение надежности в жизненном цикле
систем искусственного интеллекта
ответственного назначения**

Изложена концепция понятия «надежного» ИИ и описана реализация отдельных ее положений на этапах жизненного цикла автономной системы ответственного назначения.

В. А. Острейковский, А. В. Сорочкин
**Феномен «живучесть» в задачах обеспечения
надежности сложных критически важных
динамических систем**

Рассматриваются структурно и функционально сложные системы. Получены новые результаты применения современного функционального анализа и оценки асимметрии внутреннего времени.

*Т. В. Бойкова, А. С. Григорьев, Д. В. Маколкин,
С. А. Королев, И. А. Тутнов*
**Качество и надежность энергосистем
малой мощности**

Представлен методологический алгоритм оценки качества различных топологических решений для локальных энергосистем с установками генерации малой электрической мощности. В основе алгоритма – имитационное моделирование возможных аварийных событий, повреждений и отказов в работе линий электропередач.

Е. Ю. Шмалько

Машинное обучение систем управления с обратной связью на базе принципа синтезированного оптимального управления

В данной работе предлагается инверсный подход к синтезу оптимальной системы управления с обратной связью на основе методов машинного обучения для получения реализуемых решений задачи оптимального управления.

А. И. Иванов, Д. В. Тарасов, К. А. Горбунов

Оценки показателя херста на малых выборках: простейший вариант нелинейного компенсатора методических ошибок федера при моделировании данных экономики и биометрии

Целью работы является устранение методической ошибки, возникающей из-за малых выборок реальных данных. Используется моделирование двухмерного броуновского движения, порождающее возможность вычисления эталонных показателей Херста. Предложено средствами имитационного моделирования заранее строить нелинейный корректор методических ошибок.

№ 4 (44)

В. Р. Роганов, В. В. Швыров

Статистические и семантические методы анализа тенденций в производстве, транспортировке и использовании водоугольного топлива

Решена задача систематизации и классификации предложенных различными авторами подходов в области эффективного использования водоугольных суспензий и водоугольного топлива.

И. В. Пешков, В. А. Жигулин, Н. А. Фортунова

Моделирование процесса радиопеленгации цифровыми антенными решетками с учетом эффекта взаимного влияния антенных элементов

Описаны принципы работы радиопеленгатора на основе цифровых алгоритмов оценки угловых координат. Рассмотрен эффект взаимного влияния элементов антенной решетки, дана оценка его влияния на результаты пеленгации. Разработан ряд моделей алгоритмов оценки угловых координат для различных видов антенных решеток, проведено их сравнение.

А. И. Дивеев, Е. А. Софронова

Решение уточненной задачи оптимального управления с помощью универсальной системы стабилизации

Рассматривается задача синтеза системы стабилизации движения объекта по оптимальной траектории по результатам решения классической задачи оптимального управления.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

№ 1 (41)

Г. С. Садыхов, С. С. Кудрявцева

Нижняя доверительная граница среднего остаточного ресурса невосстанавливаемых объектов

Задача – повысить доверие к наблюдаемому объему наблюдений. Один из способов решения этой задачи – найти нижние доверительные границы среднего остаточного ресурса при заданной доверительной вероятности. Установлены нижние доверительные границы среднего остаточного ресурса невосстанавливаемых технических объектов при заданной доверительной вероятности.

А. Н. Якимов

Обеспечение чувствительности конечно-элементных моделей микроволновых антенн к внешним деформирующим воздействиям

Предложен подход к обеспечению чувствительности математической модели микроволновой зеркальной параболической антенны к внешним деформирующим воздействиям при конечно-элементном описании ее излучения. Дано электродинамическое обоснование требуемой точности построения геометрической модели микроволновой антенны.

В. Н. Китаев, М. А. Дремков, А. А. Уралев
Электрический соединитель с функцией защиты от статического электричества

Для исключения человеческого фактора в применяемых электрических соединителях решается техническая задача по шунтированию электрических цепей на корпус в расчлененном состоянии и снятию шунтирования при сочленении.

М. В. Мостовской, В. В. Слепцов, Н. Н. Куликова
Повышение надежности информационно-измерительной и управляющей системы электропривода лазерных установок

Рассматриваются актуальные направления развития регулируемого электропривода – повышение эффективности информационно-измерительных и управляющих систем.

В. П. Перевертов, Н. А. Кузин, Н. К. Юрков
Качество формообразования деталей при интеграции гибридных технологий транспортного машиностроения

На основе системного анализа предложен подход формообразования деталей сложной конфигурации. Показано, что комплексное применение традиционных, аддитивных и нанотехнологий формообразования деталей существенно повышает качество формирований поверхностей.

С. А. Дмитриев, Е. С. Симонова
Анализ отказов и повреждений авиационных двигателей за период 2007–2020 гг.

Проведена оценка основных причин неисправностей, выявленных в процессе эксплуатации, сделаны заключения и даны пояснения по конкретным группам повреждений. К основным причинам отказов авиационных двигателей, наиболее часто встречающихся в эксплуатации, относятся человеческий фактор и функциональные отказы.

№ 2 (42)

Д. В. Дерябин, Н. В. Горячев, Н. К. Юрков
Технология обработки меди и медных сплавов электромагнитными импульсами

Настоящая научная статья призвана раскрыть промышленный интерес и применимость технологии электромагнитных импульсов в различных подсекторах микроэлектронной промышленности, продвигая легкие и высокоточные инженерные компоненты.

Ю. Т. Зырянов
Методы оперативной оценки и обеспечения точностных характеристик оптико-электронных прицельно-навигационных комплексов с использованием данных средств объективного контроля (часть 1)

Разработка методов оперативной оценки и обеспечения ТХ ОЭПрНК с использованием данных средств объективного контроля на основе адаптивного управления профилактикой в межрегламентный период эксплуатации с учетом функциональных и конструктивных особенностей, внедрения концепции технического обслуживания по состоянию с контролем параметров, адекватной эксплуатационным свойствам ОЭПрНК.

Ю. Т. Зырянов
Методы оперативной оценки и обеспечения точностных характеристик оптико-электронных прицельно-навигационных комплексов с использованием данных средств объективного контроля (часть 2)

Цель работы – разработка методов оперативной оценки и обеспечения ТХ ОЭПрНК. Для достижения поставленной цели использованы методы математического моделирования, теории вероятностей и математической статистики, методы интегрального и дифференциального исчисления, метода анализа иерархий, метода группового учета аргументов.

И. А. Кубасов

**Промышленный Интернет вещей
как революционный скачок развития**

Исследованы роль и место одной из технологий – промышленного Интернета вещей в приборостроении, спрогнозированы основные направления развития промышленного Интернета вещей для успешной цифровой трансформации приборостроения.

*А. А. Трофимов, В. В. Кикот, Е. А. Фокина,
Д. М. Марков, И. Е. Смирнов*

**Исследование технологии создания
высокотемпературных текстурированных
материалов для изготовления многослойных
пьезоэлементов преобразователей**

Представлена методика разработки высокотемпературных текстурированных материалов для изготовления многослойных пьезоэлементов преобразователей.

№ 3 (43)

*В. Н. Пономарев, А. А. Трофимов,
Д. В. Дерябин, Е. А. Фокина, А. А. Максов*

**Проектирование датчика температуры
методом имитационного моделирования**

Рассмотрен вопрос по повышению требований к надежности, предъявляемых к изделиям ракетно-космической техники и их составным частям в условиях жесткой эксплуатации и внешних воздействий. Использовалось имитационное моделирование, при котором изучаемый датчик заменяется его моделью, с которой проводятся эксперименты с целью получения информации об этом объекте.

*В. Г. Полосин, С. И. Геращенко,
М. С. Геращенко, О. Е. Безбородова*

**Модель упругой оболочки в системе артерия –
манжета**

В работе предложено при построении модели изменения геометрических размеров упругой оболочки от разницы давлений использовать тензоры напряжений и деформаций в виде трехмерных векторов нормальных и касательных компонент, что обеспечило компактность и прозрачность представления вывода основных уравнений.

А. Н. Якимов

**Моделирование влияния производственных
погрешностей на излучение микроволновых
антенн**

Неизбежные погрешности, возникающие при производстве микроволновой антенны, приводят к отклонению распределения поля (тока) на ее излучающей поверхности от расчетного и соответствующему искажению диаграммы направленности. Предложен подход к решению этой задачи методом математического моделирования для двух типов остронаправленных микроволновых антенн: зеркальной параболической и микрополосковой с непрерывным и дискретным распределением электромагнитных источников в пределах излучающей поверхности соответственно.

*В. В. Кикот, Е. А. Данилова,
А. А. Трофимов, Т. О. Жуков*

**Исследование влияния повышенной
температуры на технические характеристики
пьезоэлементов из керамики
типа цирконат-титанат свинца**

Рассмотрена задача исследования пьезокерамических материалов при возрастающих требованиях к расширению диапазона рабочих температур, улучшению метрологических характеристик, устойчивости к воздействию дестабилизирующих факторов устройств, создаваемых на их основе.

А. В. Костин, Д. С. Богданов, И. С. Бобров
Анализ теплового влияния двух внутренних

Цель работы – проведение анализа взаимного влияния двух внутренних параллельных печатных

параллельных печатных проводников платы, установленных на металлическое основание и расположенных в одном слое

проводников, расположенных на одном слое, плат, установленных на металлическое основание и работающих в условиях космического вакуума, друг на друга, для выявления зависимости их температуры от расстояния между ними и определения расстояния, при котором эта зависимость практически исчезает.

№ 4 (44)

*В. П. Перевертов, А. Г. Жданов, Н. А. Кузин,
В. Н. Новикова, Н. К. Юрков*

К проблеме повышения надежности устройств диагностики наноматериалов в гибридных технологиях

Рассмотрен вопрос по расширению возможностей низкокогерентной рефлектометрии для визуализации внутренней структуры мутных сред. Целью исследования является анализ методов диагностики наноматериалов в гибридных технологиях формообразования деталей в транспортной инженерной системе (газотурбинные моторвагонные поезда, изготовленные из новых материалов).

*А. В. Зубарь, О. В. Духанов,
А. А. Громов, А. Ю. Тычков*

Способы автоматического определения границ адаптивных областей поиска соответствий на стереоизображениях

Разработаны два способа автоматического определения границ и положения адаптивной области поиска, основанные на вычислении значений массивов, содержащих координаты пикселей области поиска объекта на стереоизображении.

*Ю. В. Федюкин, Е. И. Минаков, И. Е. Агуреев,
Н. И. Хазов, В. М. Чайковский*

Построение и применение модели эффективности интеллектуальной транспортной системы

Рассмотрена задача оценки эффективности интеллектуальных транспортных систем. Сформулирована обобщенная математическая модель интеллектуальной транспортной системы, содержащая процесс управления в общем виде; представлены варианты и методика решения задачи определения эффективности внедрения интеллектуальной транспортной системы.

Е. А. Пафилов, А. В. Петешов, А. С. Ишков
Алгоритм оптимального обнаружения в поляриметрической радиолокационной системе

Предлагается рассмотреть алгоритм оптимального обнаружения в поляриметрической радиолокационной системе, обеспечивающий лучшее среди множества других алгоритмов соотношение между качеством обнаружения и количеством требуемой для этого статистической информации.

*А. И. Власов, А. В. Гараев, В. О. Захарова,
К. В. Селиванов, Д. Д. Чернышов*

Методика профилизации беспилотных летательных аппаратов на основе аддитивных технологий

Проведены систематизация и обобщение методов и средств профилизации беспилотных летательных аппаратов на основе аддитивных технологий. Систематизированы возможности аддитивных технологий и их преимущества по сравнению с традиционными технологиями производства деталей различных машин.

*А. А. Рыжов, А. В. Лысенко, И. М. Рыбаков,
В. С. Мамонтов, Н. К. Юрков*

К проблеме повышения надежности самовосстанавливающихся предохранителей

Рассмотрена специфика изготовления самовосстанавливающихся предохранителей на основе полимерной сшивки. Оценивается радиационное сшивание полимеров на фоне воздействия ионизирующего излучения с образованием поперечных химических связей между макромолекулами, приводящее к образованию пространственной сетки.

Е. А. Данилова, Н. С. Алмашкина, И. М. Рыбаков
**Применение статистических методов
 оценки надежности печатных плат**

Рассмотрены такие методы обработки и анализа статистических данных по технологическим дефектам, как построение диаграммы Исикавы, диаграммы Парето, а также ABC-анализ. Приведены результаты оценки качества печатных плат статистическими методами анализа.

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

№ 1 (41)

А. И. Иванов, А. П. Иванов, К. А. Горбунов
**Нейросетевое преобразование биометрии
 в код аутентификации: дополнение
 энтропии Хэмминга энтропией
 корреляционных связей между разрядами**

Рассматривается проблема вычисления энтропии кодов длиной в 256 бит с зависимыми разрядами на малых тестовых выборках, состоящих из 20 примеров.

*И. И. Звенигородский, Ю. Т. Зырянов,
 Д. И. Ульшин*
**Использование нейросетевых регуляторов
 для повышения энергоэффективности
 и качества системы вентиляции
 и кондиционирования воздуха
 заглубленного сооружения**

Рассмотрена задача снижения затрат электроэнергии за счет повышения эффективности использования энергоносителей, а также повышения качества управления.

А. В. Ключников
**Конструктивный облик стенда
 для прецизионного определения
 параметров массоинерционной
 асимметрии длинномерных тел
 методом динамической балансировки**

Рассмотрена задача по изготовлению сложного ротора, представляющего собой длинномерное тело вращения, внутри которого имеются рамы, отсеки, размещена в амортизации аппаратура, является приведение параметров массо-инерционной асимметрии тела к нормативам, заданным в его эксплуатационной документации.

А. М. Панкин, А. А. Калютник, В. С. Костарев
**Контроль технического состояния
 внутризонного детектора нейтронов
 в статических и динамических режимах
 работы ядерного реактора**

Рассмотрен новый метод контроля технического состояния датчика прямого заряда, используемого для измерения нейтронного потока в активной зоне ядерного реактора.

Н. В. Недопекин
**Оценка влияния температуры окружающей
 среды на режимы работы резонатора
 волнового твердотельного гироскопа**

Описаны экспериментальные результаты определения зависимости частоты собственных колебаний резонатора ВТГ-ДУС с пьезоэлектрическим управлением от значений температуры окружающей среды.

Н. О. Борщев
**Теоретическая оценка времени
 захлаживания азотно-гелиевого криостата**

Рассмотрены режимы работы созданной виртуальной двумерной конечно-элементной модели двухступенчатого азотно-гелиевого криостата, в обеспечении теоретической оценки теплового режима изделий, функционирующих в условиях воздействия факторов космического пространства.

№ 2 (42)

В. В. Самаров

Тестирование динамического выполнения кода Python программ при проведении этапа сертификационных испытаний (разработки) в системе сертификации Минобороны России

В рамках руководящего документа «Защита от несанкционированного доступа к информации» описана последовательность действий по формированию с помощью статистических данных, полученных посредством системы профилирования Python

В. Н. Савельев, Н. С. Новоточинов, Н. П. Ямпурин

Молниезащита пневмоклапана воздушного судна

Разработана электрическая схема молниезащиты от переходных процессов на отечественной элементной базе, приведена ее практическая реализация в виде печатного узла для установки в электро-механизм пневмоклапана.

№ 3 (43)

М. Е. Данилин, А. В. Заяра, В. Д. Федулов

Предложения по организации виртуальных испытаний алгоритмов распознавания объектов в системах управления мобильных робототехнических комплексов

Разработаны предложения в методику проведения виртуальных испытаний алгоритмов распознавания реперных маркеров ArUco, которые широко используются в робототехнике.

№ 4 (44)

Н. О. Борщев

Метод идентификации теплофизических характеристик теплоизоляционных материалов, предназначенных для термостатирования аппаратуры в условиях невесомости

Рассматривается последовательный алгоритм идентификации теплофизических характеристик, таких как коэффициент теплопроводности материала, массовая теплоемкость и интегрально-излучательная способность поверхности криогенной теплоизоляции для орбитального участка полета.

А. В. Заяра, В. П. Фандеев

Моделирование кратных отказов в аппаратуре мобильных робототехнических комплексов

Рассматривается диагностическая модель, описывающая состояние аппаратуры при возникновении в ней кратных отказов. Разработка диагностического обеспечения на основе этой модели позволит успешно выполнить основные задачи технического диагностирования.

М. И. Корнилова, С. В. Бусыгин, В. Н. Ковальногов, В. Н. Клячкин

Прогнозирование качества функционирования технического объекта с использованием машинного обучения

Рассмотрено горелочное устройство: оценивается качество функционирования таких устройств по одной из основных характеристик – температуре ядра пламени. Цель – разработка методики построения математической модели, которая бы обеспечила достаточно точный прогноз характеристик функционирования технического объекта.

БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

№ 1 (41)

А. В. Маслобоев

Методический подход к обеспечению жизнеспособности эколого-экономических систем российской Арктики (Часть 1. Принципы управления устойчивостью)

Работа направлена на создание и развитие методов и подходов обеспечения, оценки и регулирования экологической устойчивости арктических регионов для повышения жизнеспособности и эффективности управления функционированием эколого-экономических систем Арктики.

А. В. Маслобоев

**Методический подход к обеспечению
жизнеспособности эколого-экономических
систем российской Арктики
(Часть 2. Метод и критерии оценки)**

Рассматриваются предложенные принципы управления устойчивостью и критерии обеспечения экологической безопасности Арктики, основанные на постулатах теории устойчивого развития и концепции приемлемого риска. Обсуждаются система показателей безопасности и методический подход к оценке уровня экологической устойчивости арктических экосистем.

*А. К. Бейсенбаева, Д. С. Ергалиев,
М. А. Богачева, Е. С. Сулейманова,
А. М. Мухамбетов*

**Профайлинг как технология в системе
авиационной безопасности аэропорта**

Рассмотрено техническое оборудование, позволяющие отслеживать, идентифицировать, распознавать лица, выявлять запрещенные к перевозке предметов. Исследовано использование профайлинга как психологического метода экспресс-диагностики выявляющего потенциально опасного человека.

А. В. Маслобоев

**Применение принципа адаптационного
максимума Игнатьева в управлении
жизнеспособностью критических
инфраструктур**

Рассмотрена задача по применению современных кибернетических методов анализа сложных динамических систем с целью повышения эффективности управления жизнеспособностью и безопасностью региональных критических инфраструктур и расширения аналитических возможностей систем при поддержке принятия решений.

Е. А. Воронин, А. Г. Семкин

**Управление продовольственной
безопасностью методами машинного
обучения в информационном пространстве
аграрно-промышленного комплекса**

Рассматривается уточненная постановка задачи управления продовольственной безопасностью при формировании цифровой экономики, разработанная на основе вероятностной оценки реализации организационных, организационно-ресурсных и технико-технологических процессов обеспечения продовольственной безопасности с применением универсальной методики.