

СОДЕРЖАНИЕ

**ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ
НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА**

Острейковский В. А., Сорочкин А. В.

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ В РАЗВИТИИ
КОНЦЕПЦИИ УРОВНЕЙ ОПИСАНИЯ СТАРЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ СЛОЖНЫХ
СИСТЕМ С ДЛИТЕЛЬНЫМИ СРОКАМИ АКТИВНОГО СУЩЕСТВОВАНИЯ 5

Якимов А. Н.

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ОБОБЩЕННОЙ
МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МИКРОВОЛНОВОЙ АНТЕННЫ 16

Слизкой В. К., Боков А. С., Нагашибаев Д. Ж., Иофин А. А.

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ИМИТАЦИИ ДОПЛЕРОВСКОГО
РАССЕЯНИЯ ОТРАЖЕННОГО РАДИОСИГНАЛА 24

Мельничук А. И., Горячев Н. В., Юрков Н. К.

К ПРОБЛЕМЕ СИНТЕЗА МНОГОПОЗИЦИОННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ
СТАНЦИИ ОБНАРУЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ 33

Острейковский В. А., Сорочкин А. В.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ
ОПЕРАТОРОВ ЭВОЛЮЦИИ И ВНУТРЕННЕГО ВРЕМЕНИ В ТЕОРИИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ
СИСТЕМ С ДЛИТЕЛЬНЫМИ СРОКАМИ АКТИВНОГО СУЩЕСТВОВАНИЯ 42

Сивопаяс М. А.

МАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО
ОБСЛУЖИВАНИЯ СЛОЖНОЙ ТЕХНИКИ 49

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

Смагин В. А., Лавров Р. О., Литвиненко С. Ф.

ОБОБЩЕНИЕ ПОНЯТИЯ РЕСУРСА НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
Н. М. СЕДЯКИНА ДО РЕСУРСА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЖИВОГО ОРГАНИЗМА 54

Комаров В. А., Сарафанов А. В.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА НАЗЕМНОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
ОТРАБОТКИ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ 61

Иванов А. И., Юнин А. П., Иванов А. П., Куприянов Е. Н., Полковникова С. А.

МУЛЬТИКРИТЕРИАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗЫ НОРМАЛЬНОСТИ
И РАВНОМЕРНОСТИ МАЛЫХ ВЫБОРОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ТРОИЧНЫХ И ДВОИЧНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОНОВ 70

Белов Д. Д., Дюдина В. В., Сапрыкин В. В., Задорожный В. В., Норов П. М. РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО ДИАМЕТРА ВОЗДУХОЗАБОРНИКА ДВИГАТЕЛЬНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ.....	78
--	----

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА В ПРИБОРОСТРОЕНИИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

Крохин И. А., Михеев М. Ю. ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ АТАКАМ МАРШАЛКО НА СЕТИ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОНОВ ЗА СЧЕТ ВВЕДЕНИЯ ЛОЖНЫХ СВЯЗЕЙ.....	86
--	----

Гречишников В. М., Капитуров А. Е., Нерсиян К. Б., Теряева О. В. МУЛЬТИСЕНСОРНЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ БИНАРНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ.....	95
--	----

Крохин И. А., Михеев М. Ю., Пепел А. Н. М. РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ПОВТОРЕНИЯ ОБЩИХ СВЯЗЕЙ ДЛЯ НЕЙРОНОВ С 4 И 5 ВХОДАМИ ПРИ СЛУЧАЙНОМ ВЫБОРЕ ИЗ 512 БИОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ДАННЫХ СОПОСТАВИМОГО КАЧЕСТВА	104
---	-----

CONTENT

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

Ostreykovskiy V.A., Sorochkin A.V.
MODELS AND METHODS OF STATISTICAL RELIABILITY THEORY IN THE DEVELOPMENT
OF LEVELS OF DESCRIPTION CONCEPT FOR EQUIPMENT AGING
OF COMPLEX SYSTEMS WITH LONG PERIODS OF ACTIVE EXISTENCE.....6

Yakimov A.N.
A SYSTEMATIC APPROACH TO THE CONSTRUCTION OF A GENERALIZED
MATHEMATICAL MODEL OF A MICROWAVE ANTENNA.....16

Slizkoy V.K., Bokov A.S., Nagashibaev D.Zh., Iofin A.A.
OPTIMIZATION OF THE DOPPLER SCATTERING SIMULATION
ALGORITHM OF THE REFLECTED RADIO SIGNAL24

Mel'nichuk A.I., Goryachev N. V., Yurkov N. K.
ON THE PROBLEM OF SYNTHESIS OF A MULTI-POSITION
RADAR DETECTION STATION UNMANNED AERIAL VEHICLES.....33

Ostreykovskiy V.A., Sorochkin A.V.
MATHEMATICAL MODELING OF THE SPECTRAL REPRESENTATION
FOR EVOLUTION OPERATORS AND INTERNAL TIME IN THE THEORY
OF DURABILITY OF SYSTEMS WITH LONG PERIODS OF ACTIVE EXISTENCE42

Sivoplyas M.A.
THE MARKOV MODEL OF SAFETY OF MAINTENANCE OF COMPLEX EQUIPMENT49

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

Smagin V.A., Lavrov R.O., Litvinenko S.F.
GENERALIZATION OF THE CONCEPT OF THE RELIABILITY RESOURCE OF N.M. SEDYAKIN'S
TECHNICAL SYSTEM TO THE OPERABILITY RESOURCE OF A LIVING ORGANISM.....54

Komarov V.A., Sarafanov A.V.
INCREASING THE QUALITY OF GROUND EXPERIMENTAL RESEARCH
OF ONBOARD ELECTRONIC EQUIPMENT FOR SATELLITE CONTROL SYSTEMS61

Ivanov A.I., Yunin A.P., Ivanov A.P., Kupriyanov E.N., Polkovnikova S.A.
MULTI-CRITERIA VERIFICATION OF THE HYPOTHESIS OF NORMALITY AND UNIFORMITY
OF SMALL SAMPLES USING TERNARY AND BINARY ARTIFICIAL NEURONS70

Belov D.D., Dyudina V.V., Saprykin V.V., Zadorozhnyy V.V., Norov P.M.
CALCULATION OF THE OPTIMAL DIAMETER OF THE AIR INTAKE
OF THE PROPULSION SYSTEM FOR SMALL SPACECRAFT78

TECHNOLOGICAL BASICS FOR IMPROVING RELIABILITY AND QUALITY IN INSTRUMENTATION AND RADIO ELECTRONICS

Krokhin I.A., Mikheev M.Yu.

COUNTERING MARSHALCO'S ATTACKS ON ARTIFICIAL
NEURON NETWORKS BY INTRODUCING FALSE CONNECTIONS..... 86

Grechishnikov V.M., Kapiturov A.E., Nersisyan K.B., Teryaeva O.V.

MULTI-SENSOR FIBER-OPTIC CONVERTER OF BINARY MECHANICAL SIGNALS..... 95

Krokhin I.A., Mikheev M.Yu., Pepel L.N.M.

CALCULATION OF THE PROBABILITIES OF REPETITION OF COMMON CONNECTIONS
FOR NEURONS WITH 4 AND 5 INPUTS AT RANDOM SELECTION
OF 512 BIOMETRIC PARAMETERS FOR DATA OF COMPARABLE QUALITY..... 104

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 517.98:519.2:621.039
doi:10.21685/2307-4205-2022-3-1

МОДЕЛИ И МЕТОДЫ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ НАДЕЖНОСТИ В РАЗВИТИИ КОНЦЕПЦИИ УРОВНЕЙ ОПИСАНИЯ СТАРЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ С ДЛИТЕЛЬНЫМИ СРОКАМИ АКТИВНОГО СУЩЕСТВОВАНИЯ

В. А. Острейковский¹, А. В. Сорочкин²

^{1,2} Сургутский государственный университет, Сургут, Россия
¹academicotr@yandex.ru, ²sorochkin_av@surgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Проблема старения в оценке и анализе долговечности любых, как живых, так и технических, систем всегда была и остается животрепещущей, и медицина и техника в любом обозримом прошлом пытались найти пути и способы ее решения. Однако серьезных успехов получить пока не удалось. Самым главным в решении проблемы долговечности структурно и функционально сложных технических систем (СФСТС) всегда считалось найти теоретические и экспериментальные методы борьбы со старением. Так, для СФСТС в XX в. успешно зарекомендовали себя методы теории длительной прочности. Усилиями таких выдающихся ученых нашей страны, как А. С. Проников, В. С. Иванова, К. В. Фролов, Н. Л. Махутов, В. Н. Чувельдиев и других, были достигнуты большие успехи в развитии подходов к описанию различных уровней старения конструкционных материалов СФСТС. Достижения в этой области получили реализацию в большом количестве теоретических методик и государственных стандартов. Однако количество дефектов и отказов в СФСТС на различных этапах их жизненного цикла не уменьшается. Это часто происходит даже в таких критически важных системах, как космические, авиационные, транспортные, нефтегазовые магистральные трубопроводы. Но были и приятные неожиданности: развитие динамики и термодинамики в XIX и XX вв. в трудах Р. Ю. Клаузиуса, Д. У. Гиббса, Л. Больцмана, А. М. Ляпунова, В. И. Вернадского, А. Н. Колмогорова, И. Р. Пригожина. Были предложены новые идеи, позволяющие существенно повысить достоверность расчета показателей долговечности (ресурса, срока службы и их остаточных значений) СФСТС. В этом плане нельзя не обратить внимание на то, что в нашей стране регулярно (с периодом приблизительно 10–15 лет) выпускаются новые государственные стандарты по надежности сложных систем. Целью данной статьи являются решение задач комплексной оценки и анализ старения в теории долговечности конструкционных материалов элементов оборудования СФСТС с применением методов и моделей современной статистической теории надежности. *Материалы и методы.* Теория операторов функционального анализа и статистическая теория надежности. *Результаты и выводы.* На основе современных достижений статистических методов теории надежности были предложены новые подходы к описанию уровней старения конструкционных элементов оборудования СФСТС. В итоге разработан комплекс методик оценки и анализа влияния старения на показатели долговечности, приведенный в виде развернутой блок-схемы.

Ключевые слова: статистическая теория надежности, математическое моделирование, необратимость, долговечность, ресурс

Для цитирования: Острейковский В. А., Сорочкин А. В. Модели и методы статистической теории надежности в развитии концепции уровней описания старения оборудования сложных систем с длительными сроками активного существования // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 5–15. doi:10.21685/2307-4205-2022-3-1

MODELS AND METHODS OF STATISTICAL RELIABILITY THEORY IN THE DEVELOPMENT OF LEVELS OF DESCRIPTION CONCEPT FOR EQUIPMENT AGING OF COMPLEX SYSTEMS WITH LONG PERIODS OF ACTIVE EXISTENCE

V.A. Ostreykovskiy¹, A.V. Sorochkin²

^{1,2} Surgut State University, Surgut, Russia

¹academicistr@yandex.ru, ²sorochkin_av@surgu.ru

Abstract. *Background.* The problem of aging in assessing and analyzing the durability of any living and technical systems has always been and remains a burning one, and medicine and technology in any foreseeable past have tried to find ways and means of solving it. However, no significant progress has yet been made. The most important thing in solving the problem of durability of structurally and functionally complex technical systems (SFSTS) has always been considered to find theoretical and experimental methods for combating aging. So, for SFSTS in the XX century, the methods of the theory of long-term strength have successfully proven themselves. Through the efforts of such outstanding scientists of our country as A. S. Pronikov, V. S. Ivanova, K. V. Frolov, N. L. Makhutov, V.N. Chuveldiev and others, great success has been achieved in the development of approaches to the description of various levels of aging of SFSTS structural materials. Achievements in this area have been implemented in a large number of theoretical methods and state standards. However, the number of defects and failures in SFSTS at various stages of their life cycle continues to be high. This often happens even in such critical systems as space, aviation, transport, oil and gas main pipelines. But there were also pleasant surprises: the development of dynamics and thermodynamics in the 19th and 20th centuries in the works of R. Yu. Clausius, D. W. Gibbs, L. Boltzmann, A. M. Lyapunova, V. I. Vernadsky, A. N. Kolmogorova, I.R. Prigozhin, new ideas were proposed to significantly increase the reliability of calculating the durability indicators (resource, service life and their residual values) of the SFSTS. In this regard, it is impossible not to pay attention to the fact that in our country regularly (with a period of approximately 10–15 years) new state standards for the reliability of complex systems are issued. The purpose of this article is to solve the problems of a comprehensive assessment and analysis of aging in the theory of durability of structural materials of SFSTS equipment elements using methods and models of modern statistical theory of reliability. *Materials and methods.* Functional Analysis Operator Theory and Statistical Reliability Theory. *Results and conclusions.* On the basis of modern achievements of statistical methods of the theory of reliability, moreover, new approaches were proposed to describe the levels of aging of structural elements of SFSTS equipment. As a result, a set of methods for assessing and analyzing the effect of aging on durability indicators has been developed, presented in the form of a detailed block diagram.

Keywords: statistical theory of reliability, mathematical modeling, irreversibility, durability, resource

For citation: Ostreykovskiy V.A., Sorochkin A.V. Models and methods of statistical reliability theory in the development of levels of description concept for equipment aging of complex systems with long periods of active existence. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(3):5–15. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-3-1

Введение

За последние 50 лет XX в. и начало XXI в. в оценке свойств долговечности появились новые подходы, позволяющие существенно повысить достоверность статистических оценок в теории надежности¹. К ним относятся следующие разделы:

1. Математические модели безотказности по значениям интенсивностей дефектов и отказов как функций времени.
2. Математические модели «нагрузка–несущая способность».
3. Модели долговечности класса «физики отказов».
4. Математические модели оценки индивидуального прогнозирования остаточного ресурса элементов оборудования сложных систем.
5. Комплексные оценки и анализ показателей долговечности оборудования СФСС с применением современных моделей статистической теории надежности.

¹ ГОСТ 27.002–2015. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Термины и определения ; ГОСТ Р.56626–2015. Национальный стандарт Российской Федерации. Требования надежности и безотказности космических систем, комплексов и автоматических космических аппаратов единичного (малочисленного) изготовления с длительными сроками активного существования.

Закон Н. М. Седякина в статистической формулировке долговечности сложных систем

Памятная историческая дата – 1 апреля 1965 г., когда на научном семинаре в Ленинградской военно-воздушной инженерной академии имени А. Ф. Можайского был зачитан доклад Н. М. Седякина «Об одном физическом принципе теории надежности и его применениях». Изложенные в докладе принципы Академией наук СССР были признаны как закон. Н. М. Седякин доказал следующее утверждение [1]: в известном выражении для вероятности безотказной работы объекта

$$P_t = \exp\left(-\int_0^t \lambda(z) dz\right) \quad (1)$$

правую часть можно принять в качестве меры одного из основных показателей долговечности ресурса

$$r_t = \int_0^t \lambda(z) dz, \quad (2)$$

где $\lambda(t)$ – функция интенсивности отказов объекта за время t .

Естественно, что при времени $t = 0$ выработанный ресурс $r(t) = 0$. А если объект при $t \rightarrow \infty$ не имеет отказов и функция $\lambda(z)$ есть неубывающая функция, то и значение ресурса $z(t) \rightarrow \infty$.

В этом случае, действительно, объект работает конечное время $\tau^x = \tau$ и его ресурс составляет

$$r(\tau) = \int_0^{\tau} \lambda(z) dz, \quad (3)$$

где τ – время (наработка) безотказной работы объекта.

В предложенном Н. М. Седякиным понятии ресурса закон надежности формулируется следующим образом: «Надежность объекта зависит от значения выработанного им ресурса в прошлом и не зависит от того, как этот ресурс вырабатывается», а именно:

$$p\left(\frac{t}{r}\right) = p^{(1)}\left(\frac{t}{t_1}\right) = p^{(2)}\left(\frac{t}{t_2}\right), \quad (4)$$

где интервалы времени t_1 и t_2 должны удовлетворять интервальному соотношению

$$r(\tau) = \int_0^{t_1} \lambda(z, \varepsilon_1) dz = \int_0^{t_2} \lambda(z, \varepsilon_2) dz. \quad (5)$$

При этом индексы (1) и (2) соответствуют: случай (1) – объект работал в прошлом времени t_1 в условиях ε_1 , а во втором (2) – время t_2 и условиях ε_2 .

И это очень важно и понадобится нам для других случаев: под условиями работы объекта будем понимать степень его надежности

$$\varepsilon = S/S_0,$$

где S и S_0 – действующая и расчетная номинальные нагрузки объекта соответственно [1, 2].

Математические модели «нагрузка – несущая способность» в теории долговечности систем

Сущность модели: проводится анализ соотношения двух векторов случайных процессов:

а) $S(t)$ – нагрузки, действующей на объект в виде механических, радиационных, химических, тепловых и других нагрузок, вызывающих обратимые и необратимые процессы в конструкционных материалах структуры оборудования;

б) $R(t)$ – старения (коррозия, эрозия, износ и т.д.). Комплексы процессов $R(t)$ получили название несущей способности объекта.

Соответственно, если функция работоспособности объекта

$$\Psi(R, S, t) = R(t) - s(t) \geq 0, \quad (7)$$

будет удовлетворять (7), то такая модель именуется «нагрузка – несущая способность» (ННС). Если условие (7) не выполняется, то вероятность отказа для модели ННС равна

$$q(t) = P\{[R(t), S(t)] \in W\} = \iint_W f_{R,S}(r, s) dr(t) ds(t), \quad (8)$$

где $f_{R,S}(r, s)$ – совместная плотность распределения факторов, определяющих нагрузку и несущую способность объекта; W – область интегрирования с границами

$$W = \begin{cases} 0 \leq r(t) < \infty, \\ 0 \leq r(t) \leq s(t) < \infty. \end{cases} \quad (9)$$

В работах [1–3] детально исследованы методы оценки показателей безотказности и долговечности для различных случаев соотношения нагрузки и несущей способности объектов оборудования сложных систем. Оказалось, что так как у реальных объектов сложных систем (СС) размерность векторов R и S большая и коррелируемые связи между составляющими этих векторов различны, то непосредственное получение достоверных показателей долговечности из выражения (9) напрямую затруднительно из-за информационных и вычислительных трудностей. Поэтому предложена следующая модель ННС: «нагрузка – стационарный случайный процесс» с параметрами

$$m_s(t) = m_{s_0} = \text{const} \text{ и } \sigma_s(t) = \sigma_{s_0} = \text{const},$$

а несущая способность – нестационарный случайный процесс с монотонно убывающим математическим ожиданием

$$R(t) = R_0 \varphi(t), \quad (10)$$

где R_0 – случайная величина; $\varphi(t)$ – неслучайная функция усталости объекта.

Фактически вид функции $\varphi(t)$ и значения математического ожидания $m_R(t)$ и среднего квадратического отклонения $\sigma_{R(t)}$ определяют время безотказной работы объекта при известных значениях m_{s_0} и σ_{s_0} . Естественно, что модель $\varphi(t)$ зависит от характера процессов старения конструкционных материалов элементов оборудования объектов СС под воздействием эксплуатационных нагрузок. Именно поэтому очень важно иметь значения параметров функций $\varphi(t)$, что позволяет с большой достоверностью прогнозировать ресурс оборудования СС.

Как правило считается, что функция усталости является монотонно убывающей функцией, определенной при всех $t \geq 0$ и $\varphi(t=0) = 1$; $\lim_{t \rightarrow \infty} \varphi(t) = 0$. Также этим условиям удовлетворяет, в частности, непрерывно убывающая показательная функция

$$\varphi(t) = \exp(-Rt), \text{ при } t \geq 0, \quad (11)$$

где коэффициент R зависит от характера процессов старения конструкционных материалов объекта.

В работах [4, 5] показано, что при независимых между собой R и S выражение (8) имеет вид

$$q(t) = \iint_W f_R(r) f_S(s) dr ds = \int_0^{\infty} f_R(r) \left[\int_{\varphi(t)r}^{\infty} f_S(s) ds \right] dr, \quad (12)$$

при

$$W: \begin{cases} 0 < r < \infty, \\ r\varphi(t) \leq S < \infty, \end{cases} \quad (13)$$

где $f_R(r)$ и $f_S(s)$ – плотность распределения несущей способности и нагрузки соответственно.

Теперь на основе общих дальнейших аналитических преобразований можно в общем виде сформулировать методику оценки ресурса объекта с помощью модели надежности НСС:

- 1) расчет характеристики несущей способности объекта методами статистической динамики, теории упругости и механики разрушения твердых тел;
- 2) анализ внешних и внутренних нагрузок, действующих на объекты оборудования СС;
- 3) расчет статистических характеристик несущей способности конструкционных материалов объекта и эксплуатационных нагрузок;
- 4) расчет характеристик показателей долговечности объекта по выбранной модели ННС;
- 5) рекомендации допустимых значений долговечности в соответствии с требованиями безотказности и эффективности системы;
- 6) сравнение рассчитанных значений показателей долговечности с требованиями по остаточным ресурсам и срокам службы [3, 4].

Математические модели долговечности класса «физики отказов»

Научное направление в теории надежности под названием «физика отказов» исторически получило широкое распространение ввиду чрезвычайно важного понимания зависимости интенсивности старения от изменения физико-химических процессов в конструкционных материалах объектов оборудования под действием эксплуатационных факторов. Это имеет особое значение для уникальных и малосерийных систем. Именно поэтому исследования закономерностей свойств и состояний конструкционных материалов изучаются на субмикроскопическом, микроскопическом и макроскопическом уровнях, так как процессы диффузии, химические реакции, распад твердых тел в конце концов приводят к износу, тепловому старению, усталости, износу и ползучести и другим дефектам и отказам оборудования сложных систем.

В существующей литературе по физике отказов [1–3] приводится много примеров аналитических зависимостей влияния физико-химических процессов на время до разрушения конструкционных материалов оборудования СС¹. Приведем несколько наиболее распространенных методов. Первым является использование формулы Журкова.

Использование формулы Журкова

$$t_p = t_{p_0} \exp\left(\frac{E_a}{RT^0}\right) = t_{p_0} \exp\left(\frac{U_0 - \sigma_m \nabla}{RT^0}\right), \quad (14)$$

где t_p – время от момента приложения механической нагрузки до разрушения материала образца при растяжении; t_{p_0} – постоянная величина, равная приблизительно периоду тепловых колебаний атомов в твердом теле, равная 10^{-12} ; E_a – энергия активации процесса разрушения; U_0 – энергия, близкая к энергии сублимации материала; σ_m – напряжение, приложенное к образцу; ∇ – активационный объем материала; $R = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж / К – постоянная Больцмана; T^0 – абсолютная температура.

В работах [2, 3] доказано, что разрушение конструкционного материала элементов оборудования СС с точки зрения механики разрушения рассматривается как термоактивационный процесс, развивающийся в механически напряженном материале во времени с момента приложения к нему нагрузки, в том числе меньше критической. Причем скорость роста усталостной трещины есть некоторый функционал от коэффициента интенсивности напряженности (КИН):

$$\frac{dl}{dN} = f(k_{1 \max}, k_{1 \min}), \quad (15)$$

где $k_{1 \max}$, $k_{1 \min}$ – наибольшее и наименьшее значение КИН за цикл нагружения; $2l$ – длина трещины; N – число циклов нагружения.

¹ ГОСТ 27.002–2015. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Термины и определения ; ГОСТ Р.56626–2015. Национальный стандарт Российской Федерации. Требования надежности и безотказности космических систем, комплексов и автоматических космических аппаратов единичного (малочисленного) изготовления с длительными сроками активного существования.

Наиболее полно экспериментально изучена зависимость скорости роста трещин $\frac{dl}{dN}$, $\frac{dl}{dt}$ и размах КЭН в форме модели формулы Пэриса, которая в простейшем виде имеет вид [1]

$$\frac{dl}{dN} = C\Delta K_1^n, \tag{16}$$

где C , n – постоянные конструкционного материала, а ΔK_1 – размах КИН.

В заключение данного раздела необходимо подчеркнуть две важные мысли:

- а) физико-химические детерминированные и статистические закономерности должны быть тесно увязаны в единой динамической модели и дополнять друг друга, а не противопоставляться;
- б) научное направление «физика отказов», связанное с физико-статистическими исследованиями уникальных СС, имеет первостепенное значение.

Математические модели оценки индивидуального прогнозирования остаточного ресурса элементов оборудования сложных систем

Для эффективного использования широкого класса сложных систем с длительными сроками активного существования чрезвычайно важным вопросом является знание значений остаточного ресурса элементов оборудования. Особое внимание в этой проблематике уделяется системам критически важных направлений [4–6]. Для подобных систем процесс прогнозирования остаточного ресурса состоит из следующих этапов:

- сбор и подготовка исходных статистических данных (ИСД);
- выбор и обоснование прогнозируемой функции (ПФ) объекта;
- обработка исходных и дополнительных данных (ДИД) для оценивания неизвестных параметров ПФ,
- собственно, вычисление прогнозных значений ресурса объекта в данный момент времени.

Выбор прогнозирующей функции

В работах [2, 3] приведена типовая схема прогнозирования следующего вида (рис. 1).



Рис. 1. Схема прогнозирования

ИсД представляют выборку $Y(t_1), Y(t_2), \dots, Y(t_k)$, а дополнительные – $Y^j(t_1), Y^j(t_2), \dots, Y^j(t_k)$. Таким образом, выбор ПФ является центральным пунктом индивидуального прогнозирования долговечности объекта. Основными факторами выбора ПФ являются:

- характер протекания анализируемого процесса $Y(t)$;
- вид функций тренда;
- степень изученности тренда (математического процесса);
- прошлый опыт, позволяющий определить класс функций для описания ПФ;
- наличие неопределенных систем, влияющих на поведение процесса $Y(t)$, связанных с неконтролируемыми внешними факторами;
- погрешности исследования и др.

Математические методы для индивидуального прогнозирования процессов в теории долговечности систем

Для моделей этого класса обычного используются следующие методы:

- метод линейной фильтрации;
- метод канонических разложений случайных функций $Y(t)$;
- фильтр Калмана;
- методы, основанные на экстраполяции аппроксимирующих зависимостей.

Метод линейной фильтрации

Этот метод основан на вычислении взвешенной суммы исходных наблюдений за период времени T_n .

При этом ИсД объекта

$$Y_{K+1} = \sum_{i=1}^k Y_i W_i, \quad (17)$$

где W_i – вес, приписываемый i -му наблюдению над объектом.

Если $W_i = \frac{1}{R}$ – используется метод скользящего среднего, а если $W_1 = a, W_2 = a(1-a), \dots,$

$W_R = a(1-a)^{R-1}$ – метод экспоненциального сглаживания.

При использовании авторегрессий схемы значения W_i оцениваются методом наименьших квадратов по ИсД на участке $(t_i, t_R) \in T_n$. Корректировка весов W_i производится на основе анализа ошибки прогноза при поступлении новых данных, которая оценивается по выражению

$$e_{R+1}^2 = (Y_{R+1} - Y_R)^2 = \min. \quad (18)$$

Метод канонических разложений случайной функции $Y(t)$ прогноза

Здесь функция $Y(t)$ представляется в виде

$$Y(t) = m(t) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \phi_n(t), \quad (19)$$

где $m(t)$ – математическое ожидание $Y(t)$; A_n – некоррелированные случайные величины с нулевым математическим ожиданием; $\phi_n(t)$ – некоторые (случайные) функции.

И задача сводится к определению ϕ_n на участке T_n и вычислению коэффициентов A_n канонического разложения той реализации, которую требуется прогнозировать.

Фильтр Калмана

Позволяет исследовать физический смысл внешних воздействий на изменение внутренних процессов $Y(t)$ объекта во времени в соответствии с моделью вида

$$\frac{dY}{dt} = F(t)Y(t) + G(t)U(t), \quad (20)$$

где $F(t)$ – характеризует динамические свойства Y ; $G(t)$ – ограничения на входной сигнал; $U(t)$ – внешние воздействия.

При этом наблюдатель оценивает значения Y , который искажен помехой

$$Z(t) = H(t)Y(t) + v(t), \quad (21)$$

где $H(t)$ – учитывает связь между Y и Z , а $v(t)$ – помеха.

Методы, основанные на экстраполяции аппроксимирующих зависимостей

В этих методах прогнозирование будущего $Y(t)$ осуществляется путем применения регрессионного анализа тренда $\eta(t) = \{Y'(t)\}$ методами наименьших квадратов на будущие моменты $Y(t + \Delta t)$.

Для случайных линейных оценок $\eta(t)$ как прогнозирующей функции коэффициентов

$$\eta(\bar{\alpha}, t) = \sum_{i=0}^n \alpha_i C_i \quad (22)$$

аналитически не представляет трудностей вычисление оценок α и дисперсии $D(Y)$ и получит точечный и интервальный прогноз. А для нелинейных случаев процесса $Y(t)$ задачи прогнозирования решаются численными методами на ЭВМ.

Практические трудности применения описанного метода имеют место, когда аналитический вид тренда неизвестен априори. Поэтому предварительно необходим этап по выбору наилучшего для прогноза вида тренда.

С этой целью обычно используются условное математическое ожидание

$$M_Y = \left\{ \frac{Y(t)}{Y_1, Y_2, \dots, Y_N} \right\}$$

и дисперсия

$$\sigma_Y = \left\{ \frac{Y(t)}{Y_1, Y_2, \dots, Y_N} \right\},$$

отображающие процесс изменения состояния объекта во времени. Для этой цели достаточно одной единственной реализации $Y(t)$ и его измерений в дискретные моменты времени $\{\tau_i\}$, $i = (1, N)$ в интервале наблюдения анализируемого процесса $T_n \in (t_1, t_N)$ с последующей экстраполяцией функции на будущие моменты времени t_{N+1}, t_{N+2}, \dots

Естественно, что реализация приведенной процедуры прогнозирования процессов требует априорных знаний о предположенных структурных и статистических характеристиках исследуемых процессов.

Гипотетическая модель в общем виде такова

$$M_j \in M, j = 1, R,$$

$$M_j = \{\Omega_j, W_v^j(t, b_v), v = 1, Z_j\}, \quad (23)$$

где Ω_j – оператор преобразования, учитывающий связи составляющих модели; $W_v^j(t, b_v)$ – составляющая модели, которая отображает одну частную сторону предполагаемого физического процесса; b_v – вектор параметров составляющей $W_v^j(t, b_v)$; Z_j – число составляющих, используемых для описания модели.

Структура модели, как правило, состоит из двух составляющих: полезной и вредной (помехой измерения). Обычно помехи отражаются процессами изменения технического состояния прогнозируемого объекта и мешающими факторами. Каждая из составляющих может иметь сложную структуру. Так, полезная составляющая обычно имеет до семи возможных элементов, из которых четыре характеризуют изменения во времени математического ожидания, дисперсии, асимметрии и эксцесса прогнозируемого процесса, и другие три – скачки, выбросы и случайно обратимые изменения прогнозируемого процесса. А помеха измерений содержит две составляющие: стационарный шум измерения и аномальные измерения. Часть этих вариантов можно сократить в результате предварительного анализа технического состояния прогнозируемого объекта [2, 3].

Практика использования описываемого метода свидетельствует о возможном сокращении числа вариантов до семи даже для таких сложных и высоко ответственных систем, как, например, ядерные энергетические установки [4–6]. В результате исследований сотрудников научных школ Обнинского института атомной энергетики и Сургутского государственного университета был теоретически обоснован ряд методов, которые приведены на рис. 2.



Рис. 2. Блок-схема комплексной оценки и анализа показателей долговечности оборудования структурно и функционально сложных систем с применением современных моделей и методов статистической теории надежности

Заключение

1. XX в. подарил нам хорошо развитую теорию надежности объектов [1–5] как совокупность свойств безотказности, долговечности, готовности и ремонтпригодности и их сохраняемости.

Свойства надежности, такие как безопасность, эффективность и качество, имеют одну важную особенность: их характерные показатели – суть функции времени комплексных свойств сложных систем.

После начальных этапов своего рождения, в начале XX в., теория надежности бурно развивается и далее – в первой половине XXI в. По следующим направлениям:

- 1) статистические исследования появления дефектов и отказов;
- 2) исследование моделей «нагрузка – несущая способность»;
- 3) разработка методов «физики отказов»;

4) разработка статистических методов прогнозирования состояния объекта на различных стадиях жизненного цикла;

5) исследование полученных в конце XX в. новых статистических моделей с учетом асимметрии внутреннего времени оборудования сложных систем.

2. Из приведенных выше научных направлений одним из первых было направление исследований надежности с помощью закона Н. М. Седякина (1965 г.), центральным постулатом которого было утверждение о соотношении будущего ресурса объектов в зависимости от выработанного в прошлом ресурса и его значения в будущем с учетом независимости того, как этот ресурс вырабатывался в прошлом.

3. Большая роль в статистических исследованиях надежности в модели «нагрузка – несущая способность», в которой оценивается будущий остаточный ресурс объекта на основе статистических оценок процессов старения конструкционных материалов элементов оборудования СФСС.

4. Понимание важности зависимости интенсивности старения от изменения физико-химических процессов в конструкционных материалах элементов оборудования СФСС под действием фактов внешней среды привело к необходимости комплексного изучения закономерностей свойств и состояний конструкционных материалов на трех уровнях: субмикроскопическом, микроскопическом и макроскопическом с учетом детерминированных и статистических закономерностей по формуле Журкова и Пэриса. Это способствовало развитию нового научного направления «физики отказов» сложных критически важных, высоко ответственных систем и комплексов, часто изготавливаемых малыми партиями, а иногда вообще уникальных.

5. В развитии п. 4 в статистической теории надежности получило научное направление под названием «математические методы и модели оценки индивидуального прогнозирования остаточного ресурса».

Основным содержанием этого направления является:

- сбор и подготовка исходных статистических данных об объекте;
- выбор прогнозирующей функции объекта;
- обработка исходных и дополнительных данных;
- разработка и исследование математических моделей индивидуального прогнозирования остаточного ресурса объектов;

– вычисление прогнозирующих значений индивидуального ресурса объекта;

– оценка полученных результатов индивидуального прогнозирования ресурса объекта.

6. Математические методы и модели индивидуального прогнозирования ресурса объектов СФСС:

– метод линейной фильтрации;

– метод канонических разложений случайной функции;

– фильтр Калмана;

– методы, основанные на экстраполяции аппроксимирующих зависимостей.

7. Разработка блок-схемы комплексной оценки анализа показателей долговечности оборудования СФСС с применением современных статистических методов теории надежности.

8. Недостатком представленных в статье подходов и моделей является отсутствие в них будущего научного раздела об учете асимметрии внутреннего времени в теории долговечности сложных систем.

9. Этот недостаток будет учтен с выходом в свет в 2022 г. монографии В. А. Острейковского «Фундаментальные основы феномена асимметрии внутреннего времени в теории долговечности СФСС с длительными сроками активного существования».

Список литературы

1. Седякин Н. М. Об одном физическом принципе теории надежности и его применениях // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1966. Т. 3. С. 80–87.
2. Острейковский В. А. Теория надежности : учебник для вузов. М. : Высш. шк., 2003. С. 463.
3. Антонов А. В., Острейковский В. А. Ресурс и срок службы оборудования атомной станции (на примере энергоблоков Смоленской АЭС). М. : Инновационное машиностроение, 2017. 536 с.
4. Острейковский В. А. Строение и прогнозирование ресурса оборудования атомных станций. М. : Энергоатомиздат, 1994. 288 с.

5. Антонов А. В., Никулин М. С., Никулин А. М., Чепурко В. А. Теория надежности. Статистические модели : учеб. пособие. М. : Инфра-М, 2015. 576 с.
6. Острейковский В. А., Лысенкова С. А. Концепция современного подхода к уровням описания процессов старения структурно и функционально сложных критически важных систем с длительными сроками актинового существования // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 3. С. 5–12.

References

1. Sedyakin N.M. On one physical principle of reliability theory and its applications. *Izvestiya AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika = Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Technical cybernetics*. 1966;3:80–87. (In Russ.)
2. Ostreykovskiy V.A. *Teoriya nadezhnosti: uchebnik dlya vuzov = Theory of reliability : textbook for universities*. Moscow: Vyssh. shk., 2003:463. (In Russ.)
3. Antonov A.V., Ostreykovskiy V.A. *Resurs i srok sluzhby oborudovaniya atomnoy stantsii (na primere energoblokov Smolenskoj AES) = Resource and service life of nuclear power plant equipment (on the example of power units of the Smolensk NPP)*. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2017:536. (In Russ.)
4. Ostreykovskiy V.A. *Stroenie i prognozirovaniye resursa oborudovaniya atomnykh stantsiy = Structure and forecasting of the resource of nuclear power plant equipment*. Moscow: Energoatomizdat, 1994:288. (In Russ.)
5. Antonov A.V., Nikulin M.S., Nikulin A.M., Chepurko V.A. *Teoriya nadezhnosti. Statisticheskie modeli: ucheb. posobie = Theory of reliability. Statistical models : textbook*. Moscow: Infra-M, 2015:576. (In Russ.)
6. Ostreykovskiy V.A., Lysenkova S.A. The concept of a modern approach to the levels of description of aging processes of structurally and functionally complex critical systems with long periods of aquatine existence. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(3):5–12. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владислав Алексеевич Острейковский

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры информатики
и вычислительной техники,
Сургутский государственный университет
(Россия, г. Сургут, просп. Ленина, 1)
E-mail: academicostr@yandex.ru

Vladislav A. Ostreykovskiy

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of information theory
and computer technology,
Surgut State University
(1 Lenin avenue, Surgut, Russia)

Андрей Викторович Сорочкин

аспирант,
Сургутский государственный университет
(Россия, г. Сургут, просп. Ленина, 1)
E-mail: sorochkin_av@surgu.ru

Andrey V. Sorochkin

Postgraduate student,
Surgut State University
(1 Lenin avenue, Surgut, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 15.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 10.01.2022

Принята к публикации/Accepted 15.02.2022

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ОБОБЩЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ МИКРОВОЛНОВОЙ АНТЕННЫ

А. Н. Якимов

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

Аннотация. *Актуальность и цели.* Деформация конструкции микроволновой антенны при внешних тепловых и механических воздействиях приводит к невозможности строгого аналитического решения задачи математического описания ее излучения и оценки влияния этих воздействий на характеристики радиотехнической системы, в составе которой антенна функционирует. Перспективным направлением решения этой проблемы является использование конечно-элементного метода математического моделирования, основанного на дискретном представлении микроволновой антенны. *Материалы и методы.* Предложен системный подход к построению математической модели микроволновой антенны, функционирующей в условиях внешних воздействий, на основе приближенного конечно-элементного математического описания ее излучения, а также возникающих в ней тепловых и механических процессов. В основе объединения моделей тепловых, механических и электродинамических процессов в антенне, имеющих разную физическую природу, в обобщенную модель лежит использование единой конечно-элементной геометрической модели антенны, связанной с этими моделями. Электродинамическая модель строится с использованием методов геометрической и физической оптики, что позволяет представить электромагнитное поле излучения микроволновой антенны суперпозицией полей конечных элементов ее излучающей поверхности и учесть влияние возникающих деформаций на характеристики излучения антенны. *Результаты и выводы.* Приведенные результаты модельного исследования влияния механических и тепловых воздействий на характеристики излучения микроволновой параболической антенны, полученные с использованием предлагаемого подхода, указывают на существенное влияние этих воздействий и возможность оптимизации такой антенны по минимуму влияния внешних воздействий.

Ключевые слова: микроволновая антенна, внешние воздействия, математическая модель, конечный элемент, диаграмма направленности

Для цитирования: Якимов А. Н. Системный подход к построению обобщенной математической модели микроволновой антенны // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 16–23. doi:10.21685/2307-4205-2022-3-2

A SYSTEMATIC APPROACH TO THE CONSTRUCTION OF A GENERALIZED MATHEMATICAL MODEL OF A MICROWAVE ANTENNA

A.N. Yakimov

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

Abstract. *Background.* Deformation of the structure of the microwave antenna under external thermal and mechanical actions leads to the impossibility of a strict analytical solution to the problem of mathematical description of its radiation and evaluation of the impact of these actions on the characteristics of the radio system in which the antenna functions. A promising direction for solving this problem is the use of a finite element method of mathematical modeling based on a discrete representation of a microwave antenna. *Materials and methods.* A systematic approach to the construction of a mathematical model of a microwave antenna operating under external actions is proposed, based on an approximate finite element mathematical description of its radiation, as well as thermal and mechanical processes occurring in it. The basis of combining models of thermal, mechanical and electrodynamic processes in an antenna having different physical nature into a generalized model is the use of a single finite element geometric model of the antenna associated with these models. The electrodynamic model is constructed using the methods of geometric and physical optics, which makes it possible to represent the electromagnetic radiation field of a microwave antenna as a superposition of the fields of finite elements of its radiating surface and to take into account the influence of emerging deformations on the characteristics of the antenna radiation. *Results and conclusions.* The results of a model study

of the influence of mechanical and thermal actions on the radiation characteristics of a microwave antenna obtained using the proposed approach indicate a significant influence of these actions and the possibility of optimizing such an antenna to minimize the influence of external actions.

Keywords: microwave antenna, external actions, mathematical model, finite element, radiation pattern

For citation: Yakimov A.N. A systematic approach to the construction of a generalized mathematical model of a microwave antenna. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(3):16–23. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-3-2

Введение

Микроволновые антенны нашли широкое применение в составе радиотехнических систем различного назначения (радиолокационных систем, радиолиний связи, радиолучевых систем обнаружения и т.д.), использующих распространение электромагнитных волн через свободное пространство. Однако в процессе эксплуатации в составе таких систем антенны подвергаются температурным (сезонным и суточным изменениям температуры, перегреву поверхности солнечным излучением) и механическим (ветровым, вибрационным, ударным) воздействиям. Из-за указанных внешних воздействий излучающая поверхность микроволновой антенны деформируется, изменяя пространственные амплитудно-фазовые распределения источников возбуждения. Это приводит к изменению диаграммы направленности (ДН) и других характеристик антенны, а также отрицательно сказывается на характеристиках радиотехнической системы, в составе которой она функционирует.

Деформация конструкции микроволновой антенны при внешних тепловых и механических воздействиях приводит к невозможности строгого аналитического решения задачи математического описания ее излучения и оценки влияния внешних воздействий на характеристики радиотехнической системы. Перспективным направлением решения этой проблемы является использование конечно-элементного метода математического моделирования в силу геометрической гибкости описания трехмерной границы криволинейной излучающей поверхности антенны [1, 2].

В силу сложности решаемой задачи целесообразно использование системного подхода, который предполагает исследование антенны как системы и рассматривает все существенные взаимосвязи между ее отдельными элементами. Так как внешние воздействия на микроволновую антенну имеют разную физическую природу, в основе построения обобщенной модели антенны следует использовать единую конечно-элементную геометрическую модель этой антенны, связанную с ее тепловой, механической и электродинамической моделями [2–4].

Постановка задачи

Суть любой математической модели, предназначенной для научных исследований, заключается в отображении некоторого заданного множества M_X значений входных параметров X на множество M_Y выходных параметров Y . Это позволяет рассматривать математическую модель как некоторый математический оператор A , позволяющий по значениям входных параметров X установить выходные значения параметров Y объекта моделирования [5].

С учетом этого математическая модель микроволновой антенны, работающей в условиях внешних воздействий, в общем случае может быть представлена в виде следующей формальной системы [6, 7]:

$$Y(t) = A[X(t), Q(t), R(t)], \quad (1)$$

где t – момент времени; $Y(t) = \{Y_1(t), Y_2(t), \dots, Y_m(t)\}$ – вектор выходных параметров (характеристик) антенны, определяющих ее функциональное назначение, к которым отнесем напряженность электрического E и магнитного H поля в точке наблюдения, ДН – коэффициент направленного действия (КНД), помехозащищенность антенны; $X(t) = \{X_1(t), X_2(t), \dots, X_n(t)\}$ – вектор входных параметров, содержащий данные технического задания, а также априорную информацию о проектируемой антенне; $Q(t) = \{Q_1(t), Q_2(t), \dots, Q_p(t)\}$ – вектор внутренних параметров (или переменных состояния), характеризующих конструктивно-технологические и электрофизические свойства отдельных компонентов проектируемой антенны (к внутренним параметрам отнесем геометрические размеры и форму излучающей поверхности, а также ее электрофизические свойства); $R(t) = \{R_1(t), R_2(t), \dots, R_l(t)\}$ – вектор параметров внешних воздействий, характеризующих влияние внешних условий на

функционирование проектируемой антенны, который содержит параметры тепловых и механических воздействий на антенну.

При построении обобщенной математической модели будем полагать ее параметры фиксированными в заданный момент времени, но учитывать скорости протекания тепловых и механических процессов в конструкции микроволновой антенны при внешних воздействиях для определения последовательности проведения расчетов.

Построение обобщенной математической модели

В основе конечно-элементного подхода к математическому моделированию микроволновой антенны лежит построение модели сложной системы из математических моделей составляющих ее элементов. При этом системный подход к моделированию предполагает исследование антенны с учетом всех существенных процессов в антенне и взаимосвязи между ее отдельными элементами. Так как в основе обобщенной математической модели микроволновой антенны лежит геометрическая модель, рассмотрим ее подробнее на примере зеркальной параболической антенны. Для моделирования излучения такой антенны построим геометрическую модель ее параболического зеркала (отражателя), при этом шаг дискретизации зеркала определяется требованием к линейному размеру конечного элемента (КЭ) разбиения его излучающей поверхности, который для корректности электродинамического решения не должен превышать длину электромагнитной волны λ [2].

Качество дискретизации излучающей поверхности в значительной мере зависит от формы элементов дискретизации, причем наилучшие результаты получаются, когда форма этих элементов не слишком отличается от идеальных равносторонних треугольников, квадратов и т.д. ввиду опасности вырождения решения. Двумерная аппроксимация излучающей поверхности сводится при этом к одномерной кусочно-линейной аппроксимации функций, описывающих эту излучающую поверхность. При этом узлы криволинейной сетки, принадлежащие излучающей поверхности, остаются неизменными, а криволинейные отрезки, соединяющие их, заменяются отрезками прямых. В результате гладкая излучающая поверхность заменяется многогранной поверхностью аппроксимации с плоскими треугольными гранями [2, 8].

При этом излучающая поверхность S микроволновой антенны представляется как совокупность N независимых элементарных участков S_i , причем $S = \bigcup_{i=1}^N S_i$. Компоненты общего поля получаются простым суммированием сферических компонентов поля E_{ϕ_i} и E_{θ_i} каждого конечного элемента, E_{ϕ_j} и E_{θ_j} каждого краевого ребра кромки излучающей поверхности антенны относительно глобальной системы координат $Oxyz$ [1, 2]:

$$E_{\phi\Sigma} = \sum_i E_{\phi_i} + \sum_j E_{\phi_j}, \quad E_{\theta\Sigma} = \sum_i E_{\theta_i} + \sum_j E_{\theta_j}. \quad (2)$$

Для оценки компонент E_{ϕ_i} и E_{θ_i} наилучшим образом подходит метод Гордона [9], чувствительный к пространственному положению узловых точек и позволяющий оценить характеристику рассеяния треугольного элемента поверхности по его контуру. Компоненты E_{ϕ_j} и E_{θ_j} моделируются, как формируемые неравномерной частью возбуждающего тока, в форме А. Михаэли [10]. Отношения $E_{\phi\Sigma}$ и $E_{\theta\Sigma}$ к их максимальным значениям при разных углах точки наблюдения относительно оси антенны представляют собой функции, описывающие нормированные ДН по полю. Например, ДН антенны в горизонтальной плоскости $F(\varphi)$ с учетом полученных выражений описывается функцией

$$F(\varphi) = E_{\phi\Sigma}(\varphi) / E_{\phi\max}, \quad (3)$$

где φ – угол относительно оси антенны в горизонтальной плоскости; $E_{\phi\Sigma}(\varphi)$ – зависимость напряженности электрического поля $E_{\phi\Sigma}$ в точке наблюдения от угла φ , полученная в результате суперпозиции полей КЭ дискретизации излучающей поверхности E_{ϕ_i} с учетом их векторного характера; $E_{\phi\max} = E_{\phi\Sigma}(0)$ – максимальный уровень напряженности электрического поля, равный для симметричных антенн его значению в направлении оси симметрии.

Геометрическая модель всего объема зеркала, состоящая уже из КЭ в виде тетраэдров, содержит модель его излучающей поверхности на основе треугольных КЭ и имеет с ней общие узлы (рис. 1).

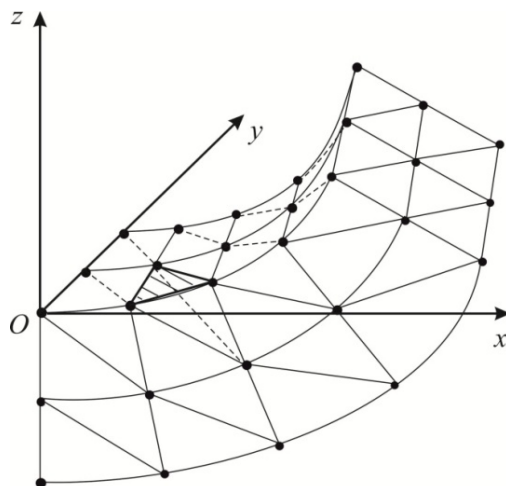


Рис. 1. Фрагмент геометрической модели параболического зеркала

Тепловая модель микроволновой антенны строится с учетом того, что тепловые процессы в окружающей среде изменяются медленно и в каждый момент времени температурное поле, воздействующее на антенну, можно считать неизменным. В этом случае для описания тепловых процессов в зеркале антенны, представляемом в виде области Ω , заполненной непрерывной средой из проводникового материала, и определения температурного поля возможно применение уравнения теплопроводности для стационарного режима (уравнение Пуассона) [11, 12]:

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \frac{q_V}{\lambda_T} = 0, \quad (4)$$

где T – температура в какой-либо точке рассматриваемой области Ω ; λ_T – коэффициент теплопроводности; q_V – объемная плотность теплового потока, действующего на антенну; x, y, z – координаты декартовой системы координат.

Полагаем, что температура окружающей среды T_c в любой момент времени задана, тогда теплообмен области Ω с окружающей средой происходит по закону Ньютона, в соответствии с которым тепловой поток через границу $\partial\Omega$ области Ω пропорционален разности температур T этой области и окружающей ее среды. В этом случае теплообмен моделируется краевым условием [11]

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n} + \alpha_{\text{ТО}} \frac{T}{\lambda_T} \right) \Big|_{\partial\Omega} = \alpha_{\text{ТО}} \frac{T_c}{\lambda_T}, \quad (5)$$

где n – нормаль к границе $\partial\Omega$; $\alpha_{\text{ТО}}$ – коэффициент теплообмена.

Так как на зеркало антенны одновременно действуют как изменение температуры окружающей среды, так и солнечное излучение, создающее перегрев, то процессы теплообмена и накопления тепла следует считать нестационарными. Поэтому для оценки изменения температурного поля антенны во времени и соответствующих искажений ее излучающей поверхности необходимо решение уравнений теплопроводности в нестационарном режиме [13].

Решение этой задачи может быть получено на базе известного классического решения задачи о нагревании со стороны одного конца полуограниченного стержня с тепловой изоляцией боковой поверхности, в котором тепло распространяется только в одном направлении. При решении задачи принимаются следующие допущения. Тепловыми потоками в направлениях перпендикулярных нормальному к излучающей поверхности антенны тепловому потоку будем пренебрегать. Это допустимо потому, что в элементах разбиения зеркала антенны, особенно в ее центральной части, происходит обмен приблизительно равными потоками тепловой энергии. Исключением являются лишь крайние элементы, где на внешней кромке происходит не обмен, а только излучение тепловой энергии. Однако, учитывая, что толщина элемента разбиения зеркала мала, то таким излучением можно пренебречь. Это позволяет сформулировать задачу аккумуляции тепла этими элементами как задачу о нагревании ограниченного стержня, боковая поверхность которого имеет тепловую изоляцию (рис. 2) [12].

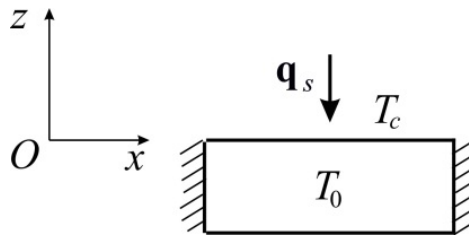


Рис. 2. Ограниченный стержень с тепловой изоляцией боковой поверхности: \mathbf{q}_s – вектор потока солнечного излучения с плотностью q_s ; T_0 – начальная температура тела, равная температуре окружающей среды T_c

Оценка изменения пространственного положения узловых точек геометрической модели в результате теплового воздействия может быть проведена с использованием локально-одномерной схемы оценки деформаций в сечениях зеркала [14, 15].

Механическая модель микроволновой антенны строится на основе того, что упругие деформации, возникающие в сплошной однородной изотропной среде (материале) зеркала антенны под воздействием ветровых, вибрационных и весовых нагрузок, могут быть описаны в рамках классической (линейной) теории упругости. В соответствии с этой теорией компоненты тензора деформации в данной точке материала зеркала при постоянной, фиксированной температуре находятся в линейной зависимости от компонент тензора механических напряжений, относящихся к этой точке [16].

Упругая деформация криволинейного отражающего зеркала оценивается по методу перемещений и при конечно-элементном представлении предполагает решение системы уравнений в матричной форме, имеющей вид [16, 17]

$$\{R\} = [K] \cdot \{\delta^c\}, \quad (6)$$

где $[K]$ – общая матрица жесткости всей конструкции зеркала; $\{R\} = \{r_1 \ r_2 \ \dots \ r_k\}^T$ – вектор сосредоточенных усилий во всех узлах сетки КЭ (кроме опорных); $\{\delta^c\} = \{\delta_1 \ \delta_2 \ \dots \ \delta_k\}^T$ – вектор перемещений всех узлов сетки КЭ, состоящий из векторов перемещений каждого узла.

Учитывая, что к каждому узлу сетки обычно примыкают несколько КЭ, вносящих вклад в матрицу жесткости, для каждого i -го узла общая матрица жесткости $[K_i]$ будет включать сумму элементов матрицы жесткости $[k_{is}]$ всех примыкающих к узлу элементов, т.е. $[K_i] = \sum_s [k_{is}]$.

Для формирования общей матрицы жесткости конструкции из матриц жесткости отдельных КЭ разработаны алгоритмы, позволяющие последовательно соединять КЭ во фрагменты более высокого уровня с помощью специальных соединительных матриц.

Результаты моделирования

С использованием предложенной конечно-элементной математической модели было проведено исследование влияния внешних воздействий, деформирующих зеркало, на электрические характеристики параболической антенны. Расчеты для математической модели антенны с зеркалом в виде параболоида вращения диаметром $D = 2$ м толщиной 3 мм с фокусным расстоянием 0,7 м, выполненного из алюминия, при облучении зеркала электромагнитной волной с $\lambda = 3$ см и вертикальной поляризацией, создаваемой рупором с размерами излучающего раскрытия в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно $0,65\lambda$ и $0,48\lambda$, и допуске серийного производства $\Delta_{\max} = 10^{-3} \cdot D$ показали следующее (рис. 3).

При температуре окружающей среды 20°C и идеально гладкой излучающей поверхности параболоида формируется ДН с шириной на уровне половинной мощности $2\varphi_{0,5} = 1,04^\circ$ и уровнем боковых лепестков (УБЛ) равным $-19,8$ дБ (рис. 3, кривая 1), которую будем называть исходной. Учет случайных производственных погрешностей и деформаций поверхности зеркала антенны из-за его перегрева солнечным излучением с интенсивностью 950 Вт/м^2 приводит по сравнению с исходной ДН к ее заметному расширению ($2\varphi_{0,5} = 1,1^\circ$) и росту УБЛ (рис. 3, кривая 2), что приводит к общим потерям коэффициента усиления (КУ) на 0,85 дБ. Дополнительный рост температуры окружающей среды с 20°C до 40°C приводит к тому, что при малом увеличении УБЛ ширина ДН достигает $2\varphi_{0,5} = 1,16^\circ$ (рис. 3, кривая 3), а общие потери КУ уже составляют 1,28 дБ.

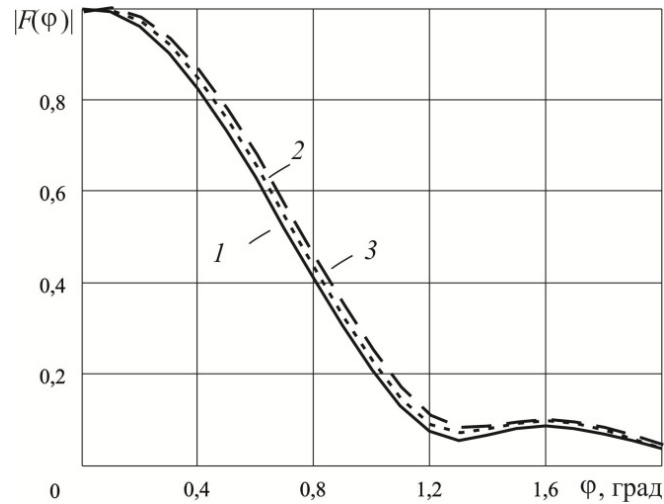


Рис. 3. Влияние солнечного перегрева и температуры среды на ДН антенны в горизонтальной плоскости

Таким образом, изменение температуры окружающей среды и перегрев поверхности отражателя реальной параболической антенны солнечным излучением существенно меняют ее характеристики, что необходимо учитывать при проектировании и эксплуатации микроволновых антенн.

Значительное влияние на характеристики микроволновой антенны оказывают и механические воздействия, например вибрационные. Для модельного исследования влияния таких воздействий на амплитудные ДН зеркальной параболической антенны была рассмотрена конструкция зеркала диаметром 0,71 м, закрепленная в центре вертикально с помощью дискового «держателя», испытывающего вибрационные колебания с различными амплитудами на частоте 48 Гц [18].

При $\lambda = 3$ см исходная ДН зеркальной параболической антенны в вертикальной плоскости, полученная с использованием КЭ электродинамической модели, до деформации зеркала имеет на уровне половинной мощности ширину $2\theta_{0,5} = 2,64^\circ$ и вид, показанный на рис. 4 (кривая 1). Эта ДН близка к результатам расчета с использованием лямбда-функций (рис. 4, кривая 2), что подтверждает адекватность предложенной математической модели [19].

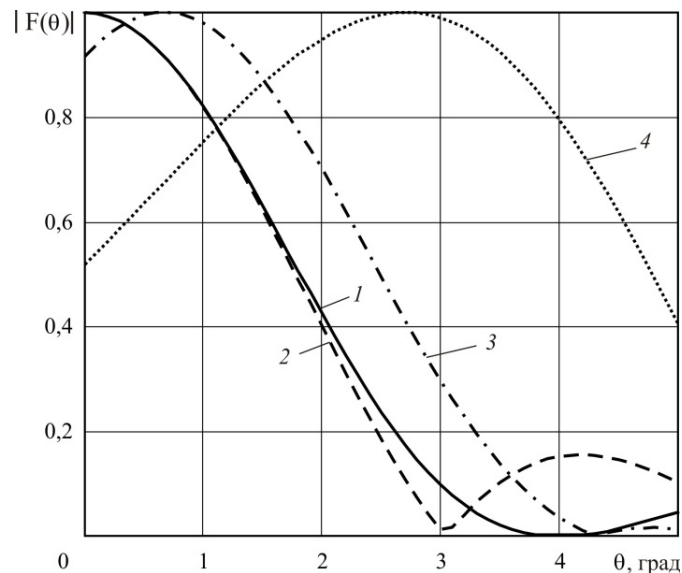


Рис. 4. Амплитудные ДН зеркальной параболической антенны

При малых деформациях параболического зеркала, возникающих из-за вибрационных воздействиях с амплитудами 1...3 мм на частоте 48 Гц (например, при полете самолета), максимум ДН смещается на угол $\theta_1 = 0,67^\circ$ (рис. 4, кривая 3), но ее ширина меняется мало ($2\theta_{0,5} = 2,66^\circ$).

При больших деформациях параболического зеркала, возникающих при вибрационных воздействиях с амплитудами 10...13 мм на частоте 48 Гц, максимум ДН смещается уже на $\theta_1 = 2,7^\circ$

(рис. 4, кривая 4), а ее ширина значительно увеличивается ($2\theta_{0,5} = 3,51^\circ$) относительно расчетных значений для недеформированного зеркала. Как видно из рис. 4, увеличение амплитуды вибрационных воздействий приводит к росту ширины ДН антенны и смещению ее максимума относительно расчетных значений в отсутствие вибраций, причем эта зависимость оказывается нелинейной.

Заключение

Предложенный подход к построению обобщенной математической модели микроволновой антенны позволяет системно исследовать сложные процессы тепловых и механических воздействий на ее конструкцию и оценить негативное изменение характеристик излучения этой антенны еще на этапе проектирования, что дает возможность создавать оптимальные в заданных условиях эксплуатации конструкции антенн.

Список литературы

1. Семенов А. А. Теория электромагнитных волн. М. : Изд-во МГУ, 1968. 320 с.
2. Якимов А. Н. К проблеме дискретного представления излучения параболической антенны // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 3. С. 17–22.
3. Звонарев С. В. Основы математического моделирования : учеб. пособие. Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2019. 112 с.
4. Бусленко Н. П. Моделирование сложных систем. М. : Наука, 1978. 400 с.
5. Введение в математическое моделирование : учеб. пособие / под ред. П. В. Трусова. М. : Логос, 2005. 440 с.
6. Батищев Д. И. Методы оптимального проектирования. М. : Радио и связь, 1984. 248 с.
7. Устенко А. С. Основы математического моделирования и алгоритмизации процессов функционирования сложных систем. М. : Изд-во МГУ, 2005. 236 с.
8. Сабоннадьер Ж. К., Кулон Ж. Л. Метод конечных элементов и САПР. М. : Мир, 1989. 190 с.
9. Gordon W. B. Far-Field Approximations to the Kirchhoff-Helmholtz Representations of Scattered Fields // IEEE Trans. on Antennas and Propagat. 1975. Vol. AP-23, № 4. P. 590–592.
10. Michaeli A. Equivalent Edge Currents for Arbitrary Aspects of Observation // IEEE Trans. on Antennas and Propagat. 1984. Vol. AP-32, № 3. P. 252–258.
11. Дульнев Г. Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре : учебник для вузов. М. : Высш. шк., 1984. 247 с.
12. Лыков А. В. Теория теплопроводности : учеб. пособие. М. : Высш. шк., 1967. 600 с.
13. Якимов А. Н. Оценка температурного поля криволинейного отражателя антенны в нестационарном режиме // Измерительная техника. 2004. № 3. С. 38–41.
14. Якимов А. Н. Обобщенная математическая модель излучения микроволновой антенны при внешних воздействиях // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. Т. 1. С. 96–100.
15. Якимов А. Н., Аброськин П. А. Математическое моделирование тепловых воздействий на криволинейную излучающую поверхность антенны // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2002. С. 172–173.
16. Тимошенко С. П., Гудьер Дж. Теория упругости. М. : Наука, 1975. 576 с.
17. Якимов А. Н., Яковлев С.А. Моделирование влияния механических воздействий на характеристики микроволновых антенн // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2006. № 6. С. 344–351.
18. Шишулин Д. Н., Юрков Н. К., Якимов А. Н. Моделирование излучения зеркальной антенны с учетом вибрационных деформаций // Измерительная техника. 2013. № 11. С. 54–56.
19. Дабкин А. Л., Зузенко В. Л., Кислов А. Г. Антенно-фидерные устройства. М. : Сов. радио, 1974. 536 с.

References

1. Semenov A.A. *Teoriya elektromagnitnykh voln = Theory of electromagnetic waves*. Moscow: Izd-vo MGU, 1968:320. (In Russ.)
2. Yakimov A.N. On the problem of discrete representation of parabolic antenna radiation. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(3):17–22. (In Russ.)
3. Zvonarev S.V. *Osnovy matematicheskogo modelirovaniya: ucheb. posobie = Fundamentals of mathematical modeling : textbook*. Ekaterinburg : Izd-vo Ural. un-ta, 2019:112. (In Russ.)
4. Buslenko N.P. *Modelirovanie slozhnykh system = Modeling of complex systems*. Moscow: Nauka, 1978:400. (In Russ.)
5. Trusov P.V. (ed.). *Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie: ucheb. posobie = Introduction to mathematical modeling : textbook*. Moscow: Logos, 2005:440. (In Russ.)

6. Batishchev D.I. *Metody optimal'nogo proektirovaniya = Methods of optimal design*. Moscow: Radio i svyaz', 1984:248. (In Russ.)
7. Ustenko A.S. *Osnovy matematicheskogo modelirovaniya i algoritimizatsii protsessov funktsionirovaniya slozhnykh system = Fundamentals of mathematical modeling and algorithmization of the processes of functioning of complex systems*. Moscow: Izd-vo MGU, 2005:236. (In Russ.)
8. Sabonnad'er Zh.K., Kulon Zh.L. *Metod konechnykh elementov i SAPR = Finite element method and CAD*. Moscow: Mir, 1989:190. (In Russ.)
9. Gordon W.B. Far-Field Approximations to the Kirchhoff-Helmholtz Representations of Scattered Fields. *IEEE Trans. on Antennas and Propagat.* 1975;AP-23(4):590–592.
10. Michaeli A. Equivalent Edge Currents for Arbitrary Aspects of Observation. *IEEE Trans. on Antennas and Propagat.* 1984;AP-32(3):252–258.
11. Dul'nev G.N. *Teplo- i massoobmen v radioelektronnoy apparature: uchebnik dlya vuzov =* . Moscow: Vyssh. shk., 1984:247. (In Russ.)
12. Lykov A.V. *Teoriya teploprovodnosti: ucheb. posobie = Theory of thermal conductivity : textbook*. Moscow: Vyssh. shk., 1967:600. (In Russ.)
13. Yakimov A.N. Evaluation of the temperature field of a curved antenna reflector in a non-stationary mode. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring technique*. 2004;(3):38–41. (In Russ.)
14. Yakimov A.N. Generalized mathematical model of microwave antenna radiation under external influences. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2018;1:96–100. (In Russ.)
15. Yakimov A.N., Abros'kin P.A. Mathematical modeling of thermal effects on the curved radiating surface of the antenna. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2002:172–173. (In Russ.)
16. Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. *Teoriya uprugosti = Theory of elasticity*. Moscow: Nauka, 1975:576. (In Russ.)
17. Yakimov A.N., Yakovlev S.A. Modeling of the influence of mechanical influences on the characteristics of microwave antennas. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences*. 2006;(6):344–351. (In Russ.)
18. Shishulin D.N., Yurkov N.K., Yakimov A.N. Modeling of the radiation of a mirror antenna taking into account vibration deformations. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring technique*. 2013;(11):54–56. (In Russ.)
19. Drabkin A.L., Zuzenko V.L., Kislov A.G. *Antenno-fidernye ustroystva = Antenna-feeder devices*. Moscow: Sov. radio, 1974:536. (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, г. Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, 67)
 E-mail: y_alder@mail.ru

Aleksandr 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)

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

Поступила в редакцию / Received 10.12.2021

Поступила после рецензирования / Revised 10.01.2022

Принята к публикации / Accepted 11.02.2022

ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ИМИТАЦИИ ДОПЛЕРОВСКОГО РАССЕЯНИЯ ОТРАЖЕННОГО РАДИОСИГНАЛА

В. К. Слизкой¹, А. С. Боков², Д. Ж. Нагашбаев³, А. А. Иофин⁴

^{1,2} Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия
^{3,4} Уральское проектно-конструкторское бюро «Деталь», Каменск-Уральский, Свердловская обл., Россия
¹ kavalerskiy@gmail.com, ² a.s.bokov@urfu.ru, ³ dmitriy.nagashibaev@gmail.com, ⁴ upkb@nexcom.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Выполнен анализ методов получения сигналов, форма спектра которых может быть описана моделью доплеровского рассеяния – спектра Джейкса, характерного для многолучевого распространения и отражения электромагнитных волн при относительном движении источника и/или приемника радиосигнала над земной поверхностью. *Материалы и методы.* Представлены модификации теоретической модели спектра Джейкса и метода суммирования синусоид для реализации на их основе цифрового генератора сигнала доплеровского смещения, предназначенного для воспроизведения эффекта доплеровского рассеяния в программно-аппаратном комплексе полунатурного моделирования работы локационных систем летательных аппаратов. *Результаты и выводы.* Предложена реализация данного генератора на базе программируемой интегральной схемы, оптимизированная по уменьшению степени перекрестной и автокорреляции формируемого сигнала и количеству использованных вычислительных ресурсов.

Ключевые слова: доплеровское рассеяние, спектр Джейкса, полунатурное моделирование, программируемая логическая интегральная схема, сумма синусоид, цифровой генератор с низкой автокорреляцией

Финансирование. Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 075-03-2022-011).

Для цитирования: Слизкой В. К., Боков А. С., Нагашбаев Д. Ж., Иофин А. А. Оптимизация алгоритма имитации доплеровского рассеяния отраженного радиосигнала // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 24–32. doi:10.21685/2307-4205-2022-3-3

OPTIMIZATION OF THE DOPPLER SCATTERING SIMULATION ALGORITHM OF THE REFLECTED RADIO SIGNAL

V.K. Slizkoy¹, A.S. Bokov², D.Zh. Nagashibaev³, A.A. Iofin⁴

^{1,2} Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Eltsin, Ekaterinburg, Russia
^{3,4} Ural Design Bureau "Detal", Kamensk-Uralsky, Sverdlovsk region, Russia
¹ kavalerskiy@gmail.com, ² a.s.bokov@urfu.ru, ³ dmitriy.nagashibaev@gmail.com, ⁴ upkb@nexcom.ru

Abstract. *Background.* An analysis was made of methods for obtaining signals whose spectrum shape can be described by the Doppler scattering model – the Jakes spectrum, which is characteristic of multipath propagation and reflection of electromagnetic waves during the relative motion of the source and / or receiver of the radio signal above the earth's surface. *Materials and methods.* Modifications of the theoretical Jakes spectrum model and the sinusoid summation method are presented for the implementation on their basis of a digital Doppler shift signal generator designed to reproduce the Doppler scattering effect in a software and hardware complex for semi-natural simulation of the operation of aircraft location systems. *Results and conclusions.* An implementation of this generator based on a programmable integrated circuit is proposed, which is optimized to reduce the degree of cross and autocorrelation of the generated signal and the amount of computing resources used.

Keywords: doppler scattering, Jakes spectrum, HIL simulation, programmable logic integrated circuit, sum of sinusoids, low autocorrelation digital oscillator

Acknowledgments. The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 075-03-2022-011).

For citation: Slizkoy V.K., Bokov A.S., Nagashibaev D.Zh., Iofin A.A. Optimization of the doppler scattering simulation algorithm of the reflected radio signal. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(3):24–32. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-3-3

Введение

В составе летательных аппаратов (ЛА) применяются несколько типов бортовых локационных систем: радиовысотомеры (РВ) различных высот, радиолокационные системы (РЛС) и радиовысотомерные системы (РВС) для зондирования земной поверхности и построения безопасной траектории движения над подстилающей поверхностью земли или моря [1–3]. В процессе разработки и тестирования данных систем возникает необходимость их проверки в широком диапазоне параметров полета. Крайних (маловысотных, сверхскоростных и т.п.) значений параметров сложно добиться при натурных испытаниях, особенно если устройство и/или ЛА находится в процессе разработки.

Таким образом, приобретают актуальность системы имитации условий полета ЛА с воспроизведением отраженных радиолокационных сигналов. Нужны системы, позволяющие производить тестирование и верификацию РВ/РЛС с различными техническими характеристиками, в различных режимах работы радиосистем, в широком диапазоне значений высоты, скорости полета, угловых эволюций ЛА. При этом необходим учет физических явлений прохождения зондирующего сигнала через среду между излучателем и приемником системы: задержка, затухание, многолучевое распространение, переотражение и доплеровское смещение частоты [4–8]. Совокупность данных параметров может являться характеристикой фоноцелевой обстановки. Системы, способные обеспечивать воспроизведение сигнала на входе работающих радиосистем путем имитации наличия радиоканала и заданных фоноцелевых обстановок, в том числе в крайних, критических и запредельных, в лабораторных условиях, называют комплексами полунатурного моделирования (КПНМ).

Перед КПНМ стоит задача имитации различных параметров с определенной степенью точности, динамическим диапазоном и разрешением, причем имитация должна происходить в режиме реального времени. В качестве алгоритма имитации явления доплеровского смещения в предыдущих версиях программно-аппаратного комплекса полунатурного моделирования [8] было реализовано умножение радиолокационного сигнала на квадратурный гармонический сигнал с возможностью управления значениями частоты и фазы. Данный метод удобен и подходит для точечных и фазетных моделей сосредоточенных (локальных) целей, но при модификации алгоритма на основе данного метода для имитации отражения от облучаемой земной поверхности требует очень много ресурсов. При этом, по сути, каждый отражатель должен быть промоделирован независимо, что невозможно из-за ограничения пропускной способности интерфейса передачи данных между ПЛИС и управляющим процессором, который и обеспечивал обновление параметров доплеровского смещения [9].

Для более адекватного воспроизведения характеристик отражения от земных поверхностей было принято решение реализовать доплеровское рассеяние на основе модели сигнала, имеющего спектр Джейкса [10]. Известным методом генерации произвольного и выбранного спектров является метод суммы синусоид [11–16], однако у данного метода есть существенные недостатки. Один из них – перекрестная корреляция генерируемого сигнала [16]. Предлагаемые модель и ее реализация призваны сгладить этот недостаток, внося элемент случайности в генерацию в процессе работы.

Цель данной работы – разработка алгоритма имитации доплеровского рассеяния формируемого отраженного сигнала в соответствии с моделью Джейкса, реализуемой на основе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) с циклом аппаратной генерации, уменьшающем перекрестную и автокорреляцию выходного сигнала. Для этого будут рассмотрены принципы построения генератора методом суммы синусоид, предложены модификации теоретической модели Джейкса и проведен анализ возможности ее реализации на базе ПЛИС.

Обзор модели доплеровского рассеяния Джейкса

Принцип работы КПНМ заключается в цифровой обработке радиолокационного сигнала, принятого от РВ/РЛС так, чтобы он стал эквивалентен отраженному от подстилающей поверхности для заданной фоноцелевой обстановки с учетом различных физических эффектов прохождения сигнала в реальных условиях и передаче сформированного сигнала на приемный вход РВ/РВС. К таким имитируемым эффектам относится среди прочих доплеровское смещение частоты радиолокационного сигнала при наличии движения РВ/РВС относительно подстилающей поверхности [7, 10, 11].

Выражение (1) описывает теоретический спектр генерируемого сигнала [4, 10]:

$$S(f) = \begin{cases} \frac{1}{\pi\sqrt{f_{\max}^2 - f^2}}, f \in (-f_{\max} \dots + f_{\max}), \\ 0, f \notin (-f_{\max} \dots + f_{\max}), \end{cases} \quad (1)$$

где $S(f)$ – гармоники сигнала на оси частот, $f \in (1 \dots N)$; N – количество гармоник; $f_{\max} = kV_{ri}/\lambda$ – частота среза, т.е. граничная частота спектра Джейкса, соответствующая значению радиальной скорости V_{ri} (для фрагмента – i -го кольца равных дальностей в пятне облучения РВ/РЛС) при длине волны λ , $k = 2$ для активной радиолокации.

Таким образом, задача разрабатываемого сегмента алгоритма имитации – генерация сигнала, спектр которого будет соответствовать данному выражению, причем должна быть возможность управления граничной частотой спектра Джейкса. Диапазон возможных значений частоты среза лежит от 0 Гц – значения, при котором генерируемый спектр вырождается в единственную гармонику – до 10 кГц – значения, являющегося достаточным для имитации движения РВ/РЛС относительно цели. Сигнал должен иметь рэлеевское распределение амплитуд [11]. Теоретическая гистограмма выборок во временной области продемонстрирована на рис. 1.

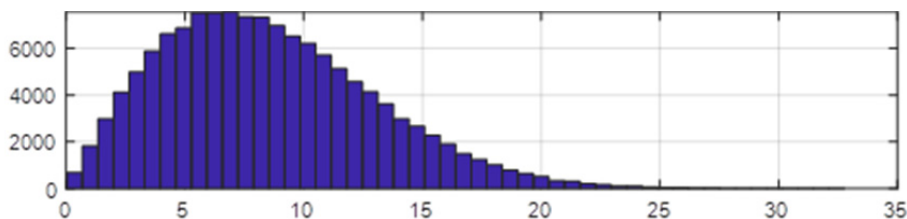


Рис. 1. Теоретическое распределение амплитуд формируемого сигнала

Кроме того, алгоритм должен иметь достаточное быстродействие либо небольшое потребление ресурсов кристалла для обеспечения возможности генерации по множеству каналов, так как для имитации отражения от большого участка поверхности необходимо воспроизвести разную ширину спектральной плотности доплеровского рассеяния в разных «бинах» дальности импульсной характеристики имитируемой радиолокационной сцены (земной/морской поверхности) [7, 9].

Проблемы, решаемые при оптимизации и адаптации данного алгоритма к аппаратной платформе [7]:

- обеспечение баланса соответствия формы спектра выходного сигнала генератора эталонному спектру Джейкса и расхода ресурсов ПЛИС;
- обеспечение соответствия характеристик быстродействия генератора требованиям систем реального времени;
- снижение степени перекрестной корреляции формируемого выходного сигнала.

Описание применения метода обратного преобразования Фурье

В качестве базы для генератора был выбран принцип прямого цифрового синтеза (DDS), который, как и при генерации одной или множества гармоник, заключается в хранении предварительно сформированных выборок сигнала в памяти и выдачу этих выборок на выход с определенной частотой, которая либо равна частоте цифровой обработки, либо ниже ее. Для этого память должна содержать предварительно сформированные квадратурные отсчеты значений сигнала. Последовательная выдача этих отсчетов позволит сгенерировать сигнал со спектром Джейкса на выходе генератора.

Такие отсчеты в виде циклической последовательности могут быть получены обратным быстрым преобразованием Фурье (ОБПФ) желаемых значений спектра после добавления к ним случайной фазы, а также дополнения нулевыми гармониками спектра в областях положительных и отрицательных частот. Теоретический спектр, полученный по формуле (1) в среде MATLAB для $f_{\max} \approx 5$ кГц, продемонстрирован на рис. 2.

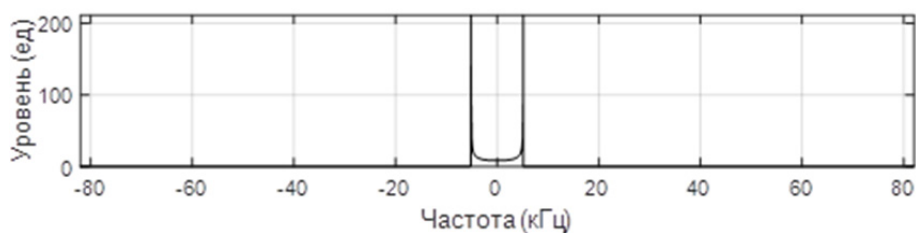


Рис. 2. Теоретическая форма спектра Джейкса

У выбранной модели есть ограничения для использования выбранного метода.

Первое – в функции, описывающей спектр, есть точки, в которых при расчете функции возможно деление на нуль за счет округления малой разности в целочисленной арифметике. Подход, выбранный для решения данной проблемы, заключается в замене гармоник в точках деления на нуль на значения равные нулю.

Второе – для приближения модели к реальности все гармоники спектра (в том числе нулевые) прошли операцию скользящего среднего (функция *smooth* в среде MATLAB) с шириной окна 8. Ширина окна выбрана кратной степени двойки для упрощения операции деления при аппаратной реализации – в этом случае деление сводится к отбрасыванию разрядов справа, количество которых равно степени двух (в нашем случае – 3).

Третье – для работы ОБПФ на вход необходимо подавать несинфазные гармоники. При несоблюдении данного условия на выходе ОБПФ будет сигнал, гистограмма которого не имеет распределения Рэлея. Пример такого сигнала во временной области приведен на рис. 3. Зеленым цветом показана реальная часть сигнала, синим – мнимая. Рисунок 4 демонстрирует распределение некорректного сигнала.

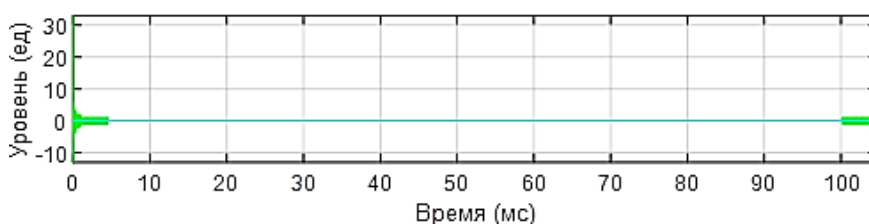


Рис. 3. Некорректная форма сигнала во временной области



Рис. 4. Распределение некорректного сигнала

Для решения этой проблемы каждой гармонике была добавлена случайная фаза путем умножения уровня на $e^{j2\pi rnd()}$, где *rnd()* – функция генерации случайного числа от 0 до 1. С учетом трех предложенных операций, примененных к теоретическому спектру, его форму можно описать выражением

$$S(f) = smooth \left(\left(\left(\begin{cases} d \frac{e^{j2\pi rnd()}}{\sqrt{f_{max}^2 - f^2}}, f \in (-f_{max} \dots + f_{max}), \\ 0, f \notin (-f_{max} \dots + f_{max}), \end{cases} \right), 8 \right) \right), \quad (2)$$

где *smooth()* – функция скользящего среднего с шириной окна 8; *d* – коэффициент пропорциональности, подбираемый для удобства нормировки (к максимальному по модулю комплексному значению) при переходе к целочисленной арифметике.

На рис. 5 в масштабе показана форма спектра, соответствующая этому выражению.

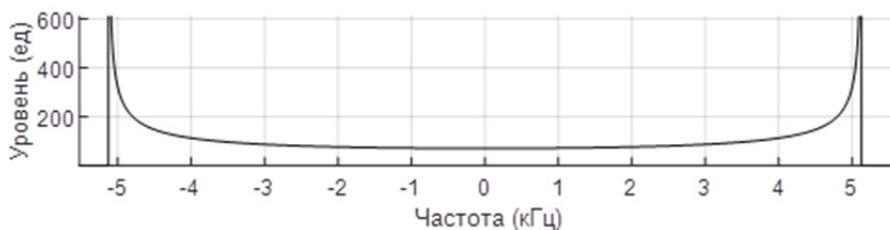


Рис. 5. Спектр сигнала после оптимизаций в масштабе

Четвертое – при математическом моделировании в среде MATLAB основные вычисления проводятся в формате знаковых чисел с плавающей запятой длиной 64 бит (double). Данный формат сложен и избыточен для обработки на ПЛИС и недопустим для передачи на цифроаналоговый преобразователь (ЦАП), поэтому массив выборок для блочной памяти был нормирован по значению к диапазону целочисленных знаковых чисел длиной 16 бит (int16), т.е. от минус 32 768 до плюс 32 767 и переведен в этот тип данных. Таким образом, при подготовке сохраняется повышенный диапазон значений в вычислениях, а в процессе работы акцент смещается на скорость вычислений.

Выборки сигнала во временной области рассчитываются согласно выражению

$$P(t) = \text{int16}(\text{ОБПФ}(S(f))), \tag{3}$$

где $P(t)$ – выборки сигнала на оси времени; ОБПФ() – функция обратного быстрого преобразования Фурье; int16() – функция нормировки – преобразования к формату int16.

Примеры выборок сигнала во временной области показаны на рис. 6, а распределение сигнала соответствует рис. 1 и является распределением Рэлея.

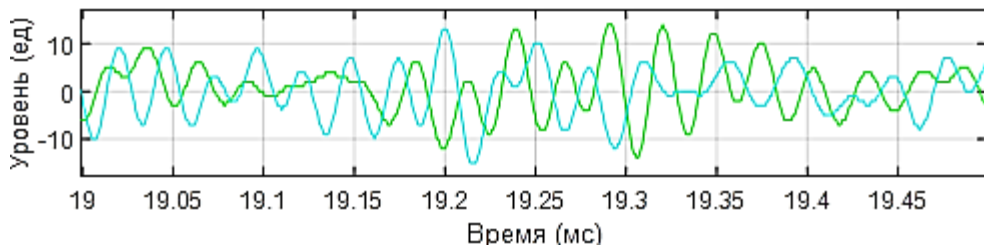


Рис. 6. Выборки сигнала на выходе ОБПФ

Резюмируя, для получения набора выборок во временной области для генерации сигнала спектра Джейкса с переменной частотой среза необходимо:

- 1) рассчитать уровни гармоник в спектре согласно (1) (кроме частот среза);
- 2) провести усреднение уровней гармоник;
- 3) добавить уровням случайную фазу, сформировав комплексные отсчеты гармоник;
- 4) добавить точки нулевых уровней гармоник;
- 5) провести ОБПФ над уровнями гармоник;
- 6) преобразовать результат в формат int16.

Реализация генератора

Все операции, приведенные выше, включая ОБПФ, возможно реализовать на базе ПЛИС [17–21]. Рисунок 7 показывает схему реализации генератора с данной математикой.

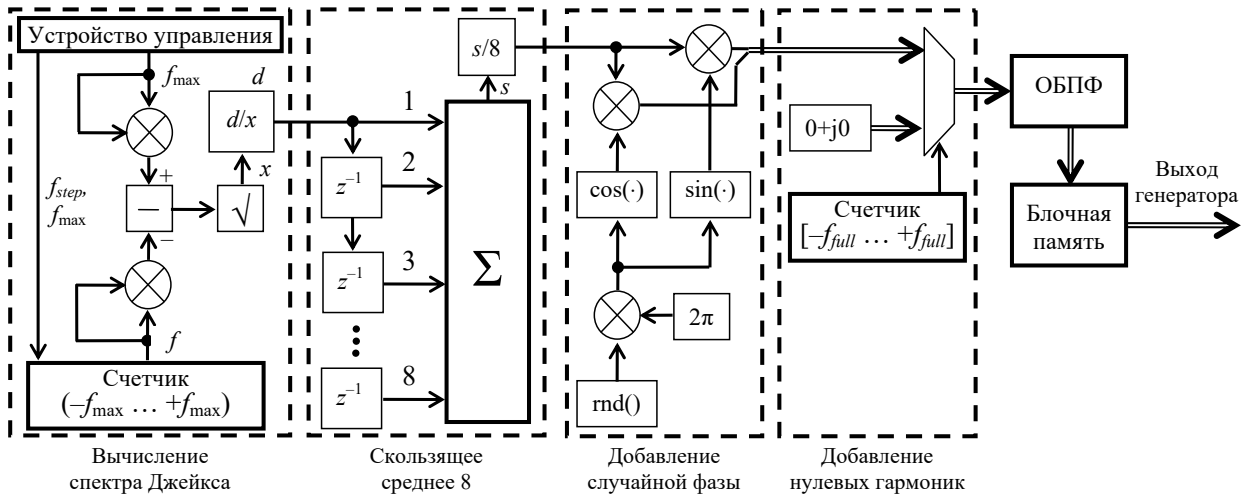


Рис. 7. Схема реализации генератора спектра Джейкса

Первая группа блоков «Вычисление спектра Джейкса» выполняет вычисление согласно формуле (1). При этом со стороны управляющего устройства поступает частота среза f_{\max} и шаг частоты f_{step} – расстояние между гармониками в частотной области, рассчитанное исходя из диапазона $-f_{\max} \dots +f_{\max}$ и количества гармоник, которые необходимо сгенерировать. Данный расчет проще производить на управляющем устройстве – процессоре, так как он включает в себя сложное деление и не требует частого обновления – данное значение необходимо обновлять не чаще, чем f_{\max} . Переменную частоту f обеспечивает счетчик, который пробегает диапазон значений $-f_{\max} \dots +f_{\max}$. Для его построения следует иметь в виду максимально возможное число гармоник и умножать значение на выходе на шаг частоты. Хотя симметричная форма спектра дает возможность сделать расчет лишь половины гармоник, выбор полного диапазона частот позволит впоследствии реализовать несимметричные формы спектров. Умножители и вычитатели могут быть реализованы на базе *DSP* ячеек, не требуя больших затрат ресурсов [18]. Несколько иначе обстоит дело с операциями извлечения квадратного корня и деления. Данные операции могут быть реализованы на базе *IP* блоков, однако это потребует сравнительно большого количества ресурсов [19, 20].

Группа вычисления скользящего среднего 8 представляет собой восемь регистров, которые хранят выборки для текущего окна в режиме *FIFO*, где выборка движется от первого регистра к последнему. При попадании первой выборки в первый регистр во всех остальных содержится значение 0, а когда ненулевые выборки заканчиваются, регистры заполняются значением 0 (на схеме не продемонстрировано). Это приводит к небольшому (несущественному по сравнению с разрешающей способностью РВ/РЛС) сглаживанию и расширению спектра за счет распределения первой и последней гармоники по восьми отсчетам справа и слева от ненулевых, которые до прохождения через скользящее среднее были нулевыми. Восьмивходовый сумматор состоит из нескольких двухвходовых суммирующих *DSP* ячеек [18]. Количество таких сумматоров равно ширине окна минус один, а глубина конвейера – логарифму по основанию 2 от ширины окна (в нашем случае 3). Деление на 8 осуществляется посредством простого отбрасывания трех правых разрядов без округления.

Генератор случайной фазы основан на генераторе случайных чисел, который можно реализовать на ПЛИС [21, 22]. Тригонометрические функции $\cos()$ и $\sin()$ могут быть реализованы на базе *IP* блоков [20].

Добавление нулевых гармоник реализовано посредством коммутатора под управлением счетчика, который считает диапазон гармоник с учетом нулевых – f_{full} . Если значение счетчика равно ненулевой гармонике – активен верхний вход, на выходе коммутатора – гармоника-результат расчета предыдущих блоков. Если значение счетчика равно нулевой гармонике – активен нижний вход, на выходе блока комплексный нуль.

Таким образом, на вход блока ОБПФ попадает f_{full} гармоник, которые в сумме представляют собой спектр Джейкса. Длина ОБПФ равна f_{full} и на выходе будет такое же число отсчетов, но уже на оси времени. Данные отсчеты необходимо записать в блочную память, так как количество тактов расчета ОБПФ в тысячи раз больше количества отсчетов сгенерированного сигнала – блок ОБПФ не сможет выдавать отсчеты в процессе работы постоянно [17].

Новизна и отличие предлагаемого метода от метода суммы синусоид заключается в возможности динамического перерасчета формы спектра, хранения и выдаче выборок готового сигнала без необходимости коррекции уровня и суммирования различных его гармоник. Динамический перерасчет формы спектра позволяет менять ширину доплеровского спектра, а также впоследствии реализовать несимметричные формы спектров, соответствующие наличию угловых эволюций ЛА.

Заключение

Теоретическое выражение для расчета формы спектра Джейкса не подходит для эффективной аппаратной реализации генератора, однако представленные модификации позволяют добиться поставленной цели.

Аппаратная платформа современных КПНМ на основе ПЛИС позволяет реализовать полный цикл генерации в реальном времени спектра Джейкса с переменными параметрами на уровне ПО, однако решение данной задачи требует большого количества ресурсов кристалла ввиду наличия операций деления, извлечения квадратного корня, тригонометрических функций, ОБПФ. Данное обстоятельство затрудняет использование предложенной схемы генератора по множеству каналов для использования в качестве входа для операции свертки в построении КПНМ [7–9].

Внесение элемента случайности при данной архитектуре генератора несколько уменьшает перекрестную и автокорреляцию выходного сигнала – он будет повторяться, пока не будет произведено вычисление очередного ОБПФ, являющееся наиболее долго выполняемым процессом в структуре генератора. Однако данной меры недостаточно для построения полностью некоррелированного сигнала (полученные при моделировании значения перекрестной корреляции не превышают значений 0,15). Корреляционная обработка считается оптимальной при анализе радиолокационных сигналов в РЛС, поэтому предположительно возможно появление «артефактов» синтезируемых радиолокационных изображений – ложных отметок. Хотя в практической радиолокации земных поверхностей всегда имеется некоторый уровень шума и пятнистость (спекл-шум), такой шум, пройдя стадию обработки (согласованной фильтрации, синтеза изображения), может иметь другие статистические характеристики. Требуется дополнительное имитационное моделирование или экспериментальное исследование в составе РВС/РЛС со сложными методами обработки сигналов для исследования степени эквивалентности характеристик формируемых сигналов.

В силу вычислительной эффективности метода ОБПФ предложенный метод генерации при равном числе ненулевых гармоник требует меньше ресурсов ПЛИС, чем метод непосредственной генерации сигналов во временной области, а также может быть доработан для непрерывного изменения только некоторой доли фаз гармоник сигнала по модели спектра Джейкса.

Список литературы

1. Скрыпник О. Н. Радионавигационные системы воздушных судов : учебник. М. : ИНФРА-М, 2018. 348 с. URL: dx.doi.org/10.12737/1064
2. Жуковский А. П., Оноприенко Е. И., Чижов В. И. Теоретические основы радиовысотометрии / отв. ред. А. П. Жуковский. М. : Сов. радио, 1979. 320 с.
3. Скольник М. Справочник по радиолокации / под ред. М. И. Скольника ; пер. с англ. под общ. ред. В. С. Вербы : в 2-х кн. М. : Техносфера, 2014. К. 1. 672 с.
4. Стругов Ю. Ф., Семенов А. М., Добровольский С. М., Батырев И. А. Разработка имитатора многолучевого канала связи с аддитивными и мультипликативными помехами // Техника радиосвязи. 2019. Вып. 4. С. 27–38. doi:10.33286/2075-8693-2019-43-27-38
5. Хлебников Д. В., Кислицын Ю. Д., Конаныхин Е. С., Лазиков Д. В. Особенности формирования фоноцелевой обстановки на комплексах полунатурного моделирования бортовых радиолокационных систем конечного наведения // Авиационные системы в XXI веке : сб. докл. науч.-техн. конф. М. : Гос. НИИ авиационных систем, 2017. С. 70–80.
6. Герасимов А. Б., Погребной Д. С., Кренев А. Н. Комплекс имитационного моделирования эхо-сигналов динамической радиофизической сцены // Молодежь и наука : материалы I внутривузовского конкурса инновационных проектов. Ярославль : Ярославский государственный университет им. П. Г. Демидова, 2009. С. 5–13.
7. Bokov A., Vazhenin V., Zeynalov E. Development and Evaluation of the Universal DRFM-based Simulator of Radar Targets // SIBIRCON 2019 : International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences. 2019. P. 182–186. doi:10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958398
8. Боков А. С., Важенин В. Г., Иофин А. А., Мухин В. В. Ретрансляционный имитатор сигналов для проверки характеристик бортовых радиолокационных систем и устройств // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 3. С. 40–49.
9. Боков А. С., Слизкой В. К., Нагашибаев Д. Ж. [и др.]. Концепция имитации отраженных сигналов для радиовысотометров в режиме реального времени // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2021. Т. 1. С. 98–103.
10. Jakes W. C. Microwave mobile communications. Lucent Technologies, 1974.
11. Cilliers J. E., McDonald A. M., Strydom J. J., Wyk van M. A. Hardware in the Loop (HIL) Generation of Airborne Clutter Using a Sum of Complex Sinusoids Technique // IEEE National Radar Conference : proceedings. 2015. P. 1510–1512.
12. Gutierrez C. A., Patzold M. The design of sum-of-cisoids Rayleigh fading channel simulators assuming non-isotropic scattering conditions // IEEE Trans. Wireless Comms. 2010. Vol. 9, № 4. P. 1308–1314.
13. Patzold M., Talha B. On the statistical properties of cisoids-based mobile radio channel simulators // Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC'07) : proc. 10th Int. Symp. Jaipur, India. 2007. P. 516–518.
14. Patzold M., Youssef N. Modelling and simulation of directionselective and frequency-selective mobile radio channels // AEU International Journal of Electronics and Communications. 2001. Vol. 55, № 6. P. 433–442.
15. Mc Donald A. M., Olivier J. C. A comparative study of deterministic and stochastic sum-of-sinusoids models of Rayleigh-fading wireless channels // Wireless Communications and Networking Conference. 2007. P. 2027–2031.

16. Pätzold M., Wang Ch.-X., Hogstad B. O. Two New Sum-of-Sinusoids-Based Methods for the Efficient Generation of Multiple Uncorrelated Rayleigh Fading Waveforms // *IEEE Transactions on wireless communications*. 2009. Vol. 8, № 6. P. 176–179.
17. LogiCORE IP Fast Fourier Transform v8.0 Datasheet. URL: https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/ds808_xfft
18. 7 Series DSP48E1. Slice User Guide. URL: https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/ug479_7Series_DSP48E1
19. LogiCORE IP Divider Generator v5.1. Product Guide. URL: <https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/pg151-div-gen>
20. LogiCORE IP Cordic v6.0. Product Guide. URL: <https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/pg105-cordic>
21. True Random Number Generator (TRNG). URL: <https://www.xilinx.com/products/intellectual-property/1-onj5tx.html#overview>
22. Justin R., Mathew B. K., Abe S. FPGA Implementation of High Quality Random Number Generator using LUT based Shift Registers // *International Conference on Emerging Trends in Engineering, Science and Technology (ICETEST 2015)*. 2016. Vol. 24. P. 1155–1162.

References

1. Skrypnik O.N. *Radionavigatsionnye sistemy vozdukhnykh sudov: uchebnik = Aircraft radio navigation systems : textbook*. Moscow: INFRA-M, 2018:348. (In Russ.). Available at: dx.doi.org/10.12737/1064
2. Zhukovskiy A.P., Onoprienko E.I., Chizhov V.I. *Teoreticheskie osnovy radiovysotometrii = Theoretical foundations of radio altimetry*. Moscow: Sov. radio, 1979:320. (In Russ.)
3. Skolnik M. (ed.). *Spravochnik po radiolokatsii = Handbook of radar / translated from English by V. S. Verby: in 2 books*. Moscow: Tekhnosfera, 2014;1:672. (In Russ.)
4. Strugov Yu.F., Semenov A.M., Dobrovolskiy S.M., Batyrev I.A. Development of a multipath communication channel simulator with additive and multiplicative interference. *Tekhnika radiosvyazi = Radio communication technology*. 2019;(4):27–38. (In Russ.). doi:10.33286/2075-8693-2019-43-27-38
5. Khlebnikov D.V., Kislitsyn Yu.D., Konanykhin E.S., Lazikov D.V. Features of the formation of the phonological situation on the complexes of semi-natural modeling of airborne radar systems of final guidance. *Aviatsionnye sistemy v XXI veke: sb. dokl. nauch.-tekhn. konf = Aviation systems in the XXI century: collection of reports of scientific and technical. conf*. Moscow: Gos. NII aviatsionnykh sistem, 2017:70–80. (In Russ.)
6. Gerasimov A.B., Pogrebnoy D.S., Krenev A.N. Complex of simulation modeling of echo signals of dynamic radiophysical scene. *Molodezh' i nauka: materialy I vntrivuzovskogo konkursa innovatsionnykh proektov = Youth and science : materials of the I intra-university competition of innovative projects*. Yaroslavl : Yaroslavskiy gosudarstvennyy universitet im. P. G. Demidova, 2009:5–13. (In Russ.)
7. Bokov A., Vazhenin V., Zeynalov E. Development and Evaluation of the Universal DRFM-based Simulator of Radar Targets. *SIBIRCON 2019: International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences*. 2019:182–186. doi:10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958398
8. Bokov A.S., Vazhenin V.G., Iofin A.A., Mukhin V.V. Relay signal simulator for checking the characteristics of airborne radar systems and devices. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2019;(3):40–49. (In Russ)
9. Bokov A.S., Slizkoy V.K., Nagashibaev D.Zh. et al. The concept of simulation of reflected signals for radio altimeters in real time. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2021;1:98–103. (In Russ.)
10. Jakes W.C. *Microwave mobile communications*. Lucent Technologies, 1974.
11. Cilliers J.E., McDonald A.M., Strydom J.J., Wyk van M.A. Hardware in the Loop (HIL) Generation of Airborne Clutter Using a Sum of Complex Sinusoids Technique. *IEEE National Radar Conference: proceedings*. 2015:1510–1512.
12. Gutierrez C.A., Patzold M. The design of sum-of-cisoids Rayleigh fading channel simulators assuming non-isotropic scattering conditions. *IEEE Trans. Wireless Comms*. 2010;9(4):1308–1314.
13. Patzold M., Talha B. On the statistical properties of cisoids-based mobile radio channel simulators. *Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC'07): proc. 10th Int. Symp*. Jaipur, India. 2007:516–518.
14. Patzold M., Youssef N. Modelling and simulation of directionselective and frequency-selective mobile radio channels. *AEU International Journal of Electronics and Communications*. 2001;55(6):433–442.
15. Mc Donald A.M., Olivier J.C. A comparative study of deterministic and stochastic sum-of-sinusoids models of Rayleigh-fading wireless channels. *Wireless Communications and Networking Conference*. 2007:2027–2031.
16. Pätzold M., Wang Ch.-X., Hogstad B.O. Two New Sum-of-Sinusoids-Based Methods for the Efficient Generation of Multiple Uncorrelated Rayleigh Fading Waveforms. *IEEE Transactions on wireless communications*. 2009;8(6):176–179.
17. LogiCORE IP Fast Fourier Transform v8.0 Datasheet. Available at: https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/ds808_xfft
18. 7 Series DSP48E1. Slice User Guide. Available at: https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/ug479_7Series_DSP48E1
19. LogiCORE IP Divider Generator v5.1. Product Guide. Available at: <https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/pg151-div-gen>

20. *LogiCORE IP Cordic v6.0. Product Guide*. Available at: <https://docs.xilinx.com/v/u/en-US/pg105-cordic>
21. *True Random Number Generator (TRNG)*. Available at: <https://www.xilinx.com/products/intellectual-property/1-onj5tx.html#overview>
22. Justin R., Mathew B.K., Abe S. FPGA Implementation of High Quality Random Number Generator using LUT based Shift Registers. *International Conference on Emerging Trends in Engineering, Science and Technology (ICETEST 2015)*. 2016;24:1155–1162.

Информация об авторах / Information about the authors

Валерий Константинович Слизкой

аспирант, инженер департамента радиоэлектроники и связи, Институт радиоэлектроники и информационных технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)
E-mail: kavalerskiy@gmail.com

Александр Сергеевич Бокон

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент департамента радиоэлектроники и связи, Институт радиоэлектроники и информационных технологий, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32)
E-mail: a.s.bokov@urfu.ru

Дмитрий Жубатканович Нагашбаев

начальник научно-тематического отдела, Уральское проектно-конструкторское бюро «Деталь», (Россия, Свердловская обл., г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8)
E-mail: dmitriy.nagashibaev@gmail.com

Александр Аронович Иофин

кандидат технических наук, заместитель главного конструктора, Уральское проектно-конструкторское бюро «Деталь», (Россия, Свердловская обл., г. Каменск-Уральский, ул. Пионерская, 8)
E-mail: upkb@nexcom.ru

Valeriy K. Slizkoy

Postgraduate student, engineer of the department of radioelectronics and communications, Institute of Radio Electronics and Information Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Eltsin (32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Aleksandr S. Bokov

Candidate of technical sciences, senior researcher, associate professor of the department of radioelectronics and communications, Institute of Radio Electronics and Information Technologies, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Eltsin (32 Mira street, Ekaterinburg, Russia)

Dmitriy Zh. Nagashibaev

Head of the scientific and thematic department, Ural design bureau "Detal" (8 Pionerskaya street, Sverdlovsk Region, Kamensk-Uralsky, Russia)

Aleksandr A. Iofin

Candidate of technical sciences, deputy chief designer, Ural design bureau "Detal" (8 Pionerskaya street, Sverdlovsk Region, Kamensk-Uralsky, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 23.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 20.01.2022

Принята к публикации/Accepted 18.02.2022

К ПРОБЛЕМЕ СИНТЕЗА МНОГОПОЗИЦИОННОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ ОБНАРУЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

А. И. Мельничук¹, Н. В. Горячев², Н. К. Юрков³

¹ Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков
имени Героя Советского Союза А. К. Серова МО РФ, Ртищево, Саратовская обл., Россия
^{2,3} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
¹ pelmenio@mail.ru, ² ra4foc@yandex.ru, ³ yurkov_NK@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Дается подход к проблеме обнаружения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Рассмотрены возможные варианты построения многопозиционной радиолокационных станций (МП РЛС) для обнаружения БПЛА с использованием сигналов передатчиков, расположенных на аэростатах. *Материалы и методы.* Предложено несколько вариантов построения многопозиционных систем в зависимости от количества приемных позиций и используемых передатчиков. Рассмотрен алгоритм оценки координат обнаруженного объекта в отдельной многочастотной радиолокационной системе с приемной позицией и несколькими различными типами передатчиков многопозиционной РЛС, расположенной на аэростатах. *Результаты и выводы.* Осуществлен выбор структуры, схемы построения МП РЛС, а также метода определения координат летящей цели.

Ключевые слова: беспилотные летательные аппараты, противодействие БПЛА, обнаружение малогабаритных БПЛА, многопозиционная радиолокационная станция, увеличение дальности обзора, РЛС на привязных аэростатах, разностно-дальномерный метод, полуактивная МП РЛС

Для цитирования: Мельничук А. И., Горячев Н. В., Юрков Н. К. К проблеме синтеза многопозиционной радиолокационной станции обнаружения беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 33–41. doi:10.21685/2307-4205-2022-3-4

ON THE PROBLEM OF SYNTHESIS OF A MULTI-POSITION RADAR DETECTION STATION UNMANNED AERIAL VEHICLES

A.I. Mel'nichuk¹, N.V. Goryachev², N.K. Yurkov³

¹ Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots named after Hero
of the Soviet Union A.K. Serov of Russian Ministry of Defense, Rtishchevo, Saratov Region, Russia
^{2,3} Penza State University, Penza, Russia
¹ pelmenio@mail.ru, ² ra4foc@yandex.ru, ³ yurkov_NK@mail.ru

Abstract. *Background.* An approach to the problem of detection of unmanned aerial vehicles (UAVs) is given. Possible options for building a multi-position radar station (MP radar) for detecting UAVs using signals from transmitters located on balloons are considered. *Materials and methods.* Several options for constructing multi-position systems are proposed, depending on the number of receiving positions and the transmitters used. An algorithm for estimating the coordinates of a detected object in a separate multi-frequency radar system with a receiving position and several different types of transmitters of a multi-position radar located on balloons is considered. *Results and conclusions.* The choice of the structure, scheme for constructing the MP radar, as well as the method for determining the coordinates of a flying target has been made.

Keywords: unmanned aerial vehicles, UAV countermeasures, detection of small-sized UAVs, multi-position radar station, increase in viewing range, radar on tethered balloons, difference-range method, semi-active MP radar

For citation: Mel'nichuk A.I., Goryachev N.V., Yurkov N.K. On the problem of synthesis of a multi-position radar detection station unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(3): 33–41. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-3-4

Введение

В настоящее время беспилотные летательные аппараты находят свое применение во многих сферах деятельности, даже в тех, где ранее их применение считалось невозможным. Увеличение численности применяемых БПЛА и ДПЛА, а также их доступность породили проблемы, связанные с различными аспектами жизнедеятельности общества. БПЛА могут применяться не только в мирных целях, но уже доработанные террористическими организациями гражданские модели несут угрозу здоровью и жизни людей, осуществляют разведку. Также создаются угрозы применения БПЛА для организации контрабанды, нанесению ущерба промышленных объектов, которые могут влиять на целые сектора экономики не только отдельных стран, но и мировых рынков.

При осуществлении противодействия БПЛА И ДПЛА одной из главных задач является задача пространственного обнаружения летательного аппарата. Своевременное обнаружение дает возможность эффективно противодействовать работе дронов, поэтому непрерывная работа средств обнаружения очень важна. Ввиду конструктивных особенностей дронов, малогабаритных размеров для обнаружения БПЛА и ДПЛА применяют как активные системы, так и пассивные.

Противодействуют БПЛА и ДПЛА комплексы ПВО, обладающие большой огневой мощностью, а также мощные РЛС, подходящие для противодействия средних и больших БПЛА, авиации, требуют больших финансовых затрат по сравнению со стоимостью малогабаритных дронов. Ракетное вооружение и управляемые снаряды затратны. Также своевременному обнаружению малогабаритных БПЛА мешают рельеф и плотная городская застройка, поэтому увеличение мощности, разработка перспективных ФАР и АФАР не всегда являются решением задачи. В данном случае предлагается решить задачу путем поднятия на определенную высоту небольшой двухчастотной многопозиционной РЛС для увеличения дальности обзора.

В данной работе описываются предлагаемые разновидности построения активной многопозиционной РЛС, расположенной на привязных аэростатах, для обнаружения малогабаритных БПЛА, в целях своевременного обнаружения и принятия решения. В построении многопозиционной РЛС могут использоваться как разное количество передатчиков, расположенных на аэростатах, так и разное количество приемных позиций, расположенных на земной поверхности.

Структурная схема построения МП РЛС по обнаружению БПЛА

Схема размещения модулей ПРД и ПРМ определяется поставленной задачей, в соответствии с этим форма зоны обзора может быть различная.

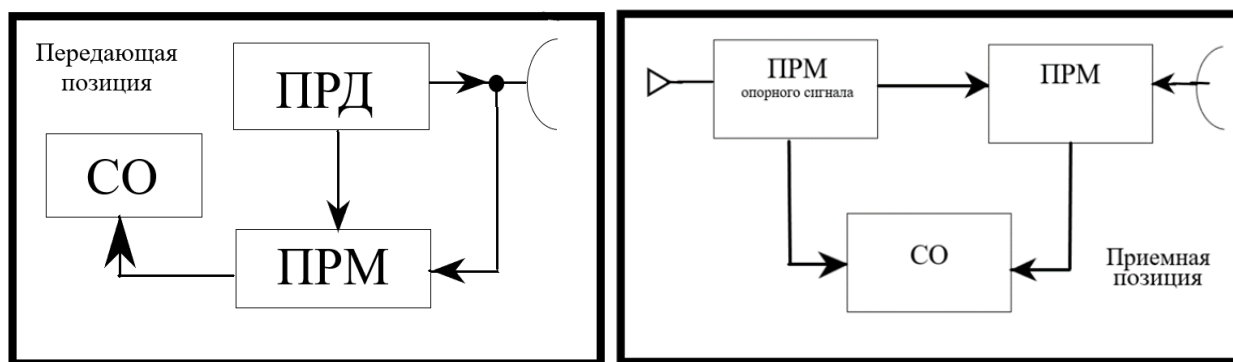


Рис. 1. Структурная схема полуактивной РЛС

Для обнаружения малогабаритных БПЛА целесообразно использовать небольшие МП РЛС. Позиции содержат модули передатчиков (ПРД) и модули приемников (ПРМ), которые работают в дециметровом и сантиметровом диапазоне волн, который описывается как рекомендуемый для обнаружения БПЛА. В полуактивной РЛС используются две разнесенные в пространстве разные позиции: приемная и передающие.

Варианты построения многопозиционной полуактивной радиолокационной системы

Тенденции развития радиоэлектронной техники в сфере радиолокационного обнаружения летательных аппаратов связаны с решением задач увеличения дальности обнаружения, повышения функциональных возможностей, совершенствованием основных характеристик.

В соответствии с решаемыми задачами используются многопозиционные радиолокационные системы. Они сложнее однопозиционных, но обладают положительными качествами: повышается надежность (устойчивость) работы системы при отказе отдельных позиций, входящих в систему. Также улучшаются такие характеристики, как надежность оценки параметров наблюдаемого объекта, точность системы, возможность сформировать сложную пространственную зону обзора.

Многопозиционная РЛС – система, состоящая из приемной(ых) позиции(ий) и передающих позиций, обработка сигналов которых выполняется в пункте обработки информации.

Варианты построения МП РЛС могут быть рассмотрены в нескольких вариациях:

1. С несколькими источниками, расположенными на аэростате, принимает отраженный сигнал одна приемная позиция (рис. 2).

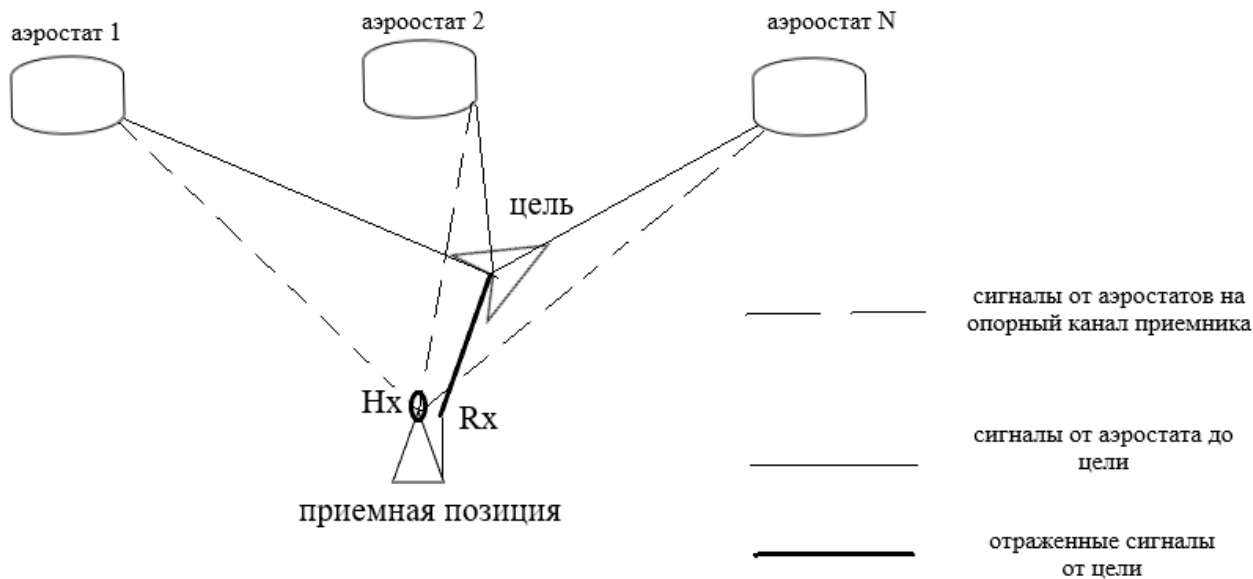


Рис. 2. Структура МП РЛС с множеством передатчиков

2. С несколькими позициями приема и одним передатчиком (каждый системный компонент «РЛС аэростата – цель – приемная позиция» может быть представлена как отдельная бистатическая ПАРЛС) (рис. 3).

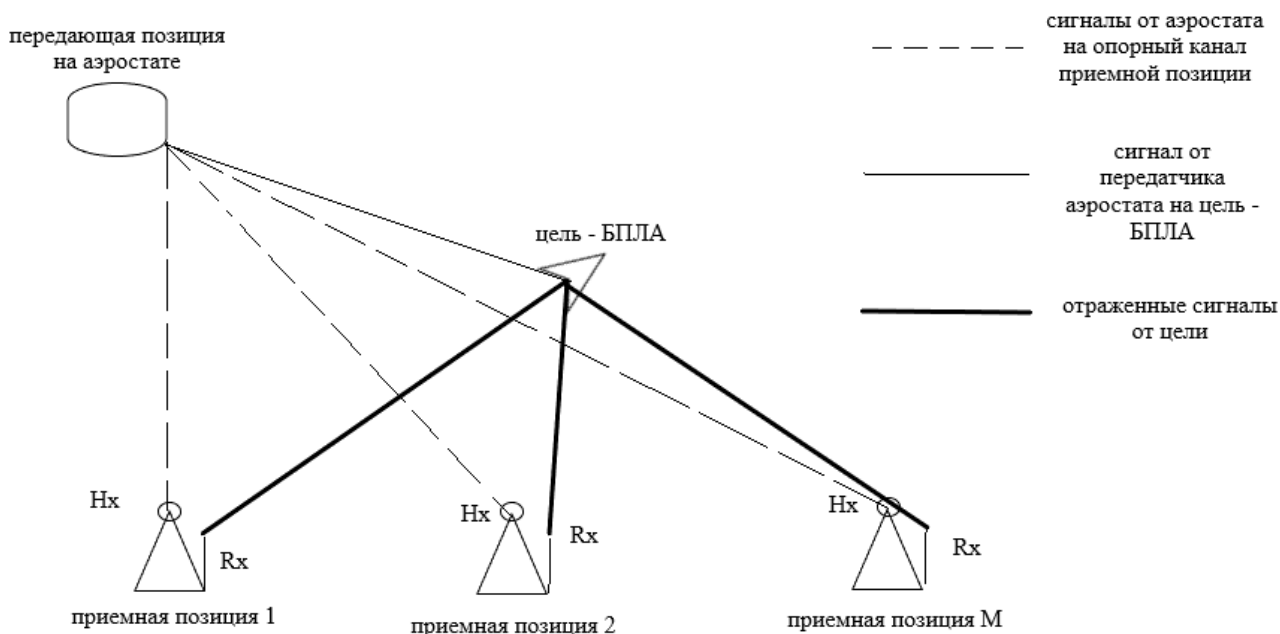


Рис. 3. Структура МП РЛС с множеством приемников

3. С несколькими позициями приема и несколькими передатчиками (РЛС на аэростатах) – более сложная (рис. 4).

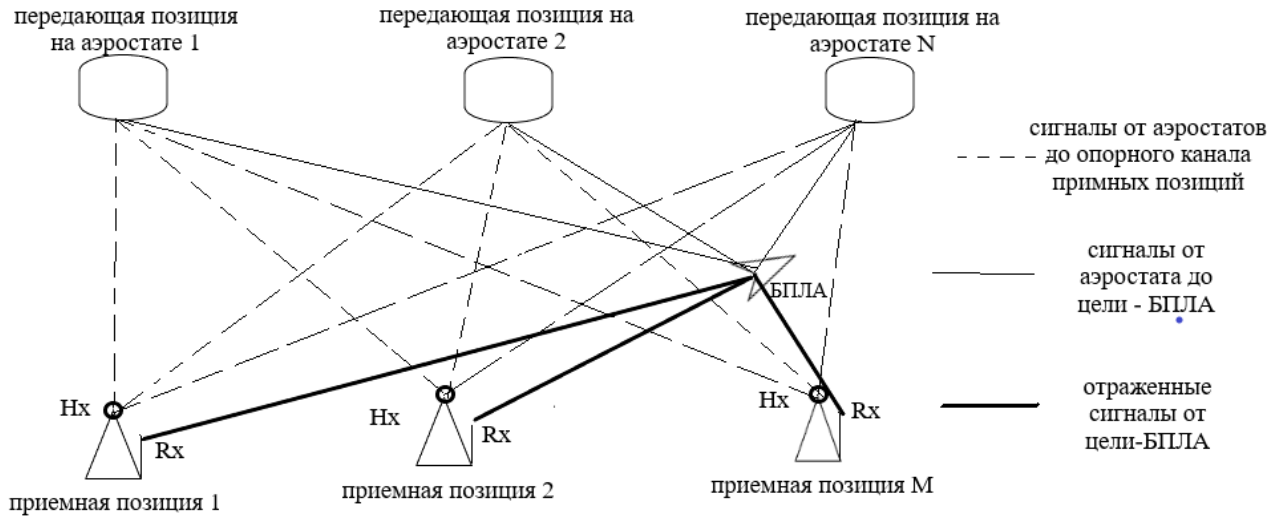


Рис. 4. Структура МП РЛС с распределенным множеством приемников и передатчиков

Обработка информации может быть организована также в нескольких вариантах. В любом из представленных вариантов возможна обработка информации в каждой отдельной приемной позиции, после чего обработанная информация подается в центр обработки информации. Центром обработки может выступать как одна позиция приема, так и несколько таких позиций. Также возможен прием не обработанной информации сразу на центр обработки информации, где она обрабатывается и объединяется с последующим отображением воздушной обстановки.

Исходя из вышеописанного, РЛС может быть реализована по нескольким схемам:

- а) один передатчик и несколько приемных позиций M ;
- б) несколько передатчиков N и одна приемная позиция;
- в) несколько приемников M и несколько передатчиков N .

Системность и комплексность подхода к задаче мониторинга воздушного пространства в интересах противодействия БПЛА и ДПЛА и создания единой системы эшелонированной ПВО (создания единого информационного поля для борьбы со всеми типами летательных аппаратов). Предполагается, что все рассмотренные варианты построения многопозиционной РЛС должны быть в дальнейшем интегрированы с другими используемыми системами.

Определение координат цели в МП РЛС

При построении многопозиционной РЛС, реализованной по схеме с несколькими передатчиками, расположенными на аэростатах, и одним приемником, расположенным на земной поверхности, целесообразно воспользоваться следующим алгоритмом определения координат цели с использованием разностно-дальномерного метода.

В прямоугольной системе координат представлена рассматриваемая многопозиционная РЛС (рис. 5). Согласно схеме приемник находится в ее начале с координатой $(0, 0, 0)^T$, обнаруженная цель $x = (x, y, z)^T$, координаты i -передатчика – $(x_i, y_i, z_i)^T$, причем $i = 1, \dots, N$.

В прямоугольной системе координат можно измерить расстояние между двумя точками с помощью прямой, используя евклидово расстояние. Согласно теореме Пифагора, учитывая координату z , евклидово расстояние между позицией приемника и целью

$$R_r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \|x\|. \quad (1)$$

Расстояние, от i -го аэростата РЛС до позиции приема:

$$L_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2 + z_i^2} = \|x_i\|. \quad (2)$$

Расстояние равное от i -го аэростата с РЛС до цели выражается соотношением

$$R_{ii} = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} = \|x_i - x\|. \quad (3)$$

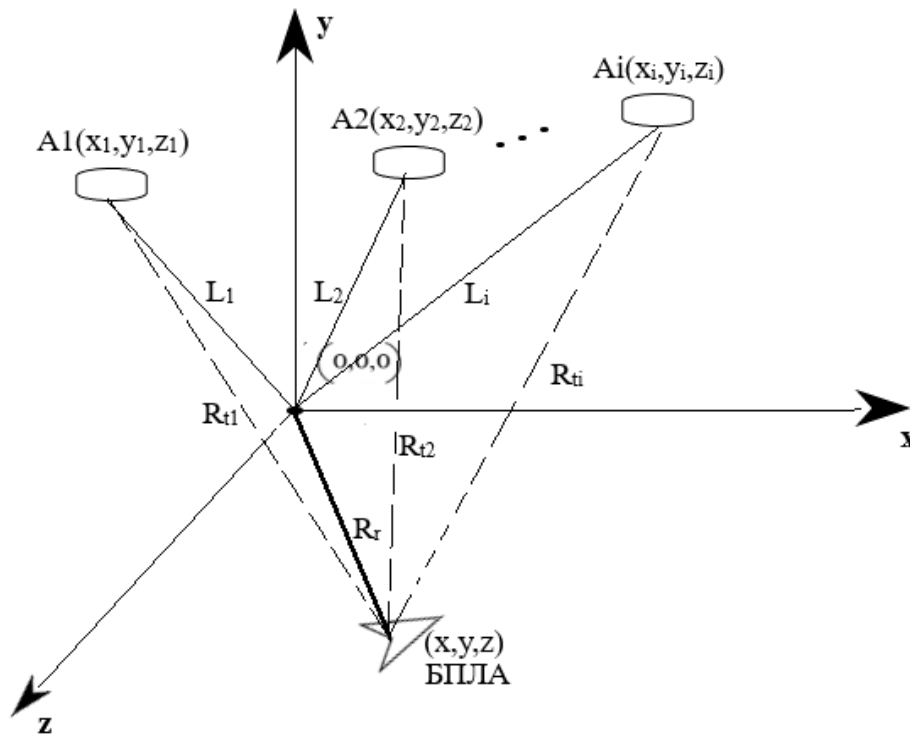


Рис. 5. Векторное представление работы МПРЛС

При реализации схемы с несколькими передатчиками и одной приемной позицией содержится несколько бистатических геометрий. Для установления координат объекта на плоскости приемная позиция измеряет азимут объекта и время запаздывания τ отраженного сигнала относительно прямого.

По задержке сигнала можно определить бистатическую дальность $r_b = c \tau = r_\Sigma - L$, где $r_\Sigma = R_r + R_i$ – суммарная дальность.

Бистатическая дальность для i -го аэростата с РЛС рассмотрена в следующем уравнении:

$$r_{bi} = R_r + R_{ii} - L_i.$$

Выполнив перестановку $R_r - L_i$ в правую часть уравнения и подставив (1)–(3) в выражение (4), последнее принимает вид

$$r_{bi} + L_i - \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}. \quad (5)$$

Преобразовав и возведя в квадрат уравнение, получено

$$(L_i^2 - (r_{bi} + L_i)^2) / 2 + (r_{bi} + L_i) \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = xx_i + yy_i + zz_i. \quad (6)$$

В матричном виде уравнение (6) можно представить

$$S_x = k + dR_r, \quad (7)$$

где S – матрица координат местоположений аэростатных передатчиков:

$$S = \begin{pmatrix} x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_m & y_m & z_m \end{pmatrix}_{N \times 3}; \quad (8)$$

k – вектор постоянных коэффициентов:

$$k = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} L_1^2 - (r_{b1} + L_1)^2 \\ \dots \\ L_M^2 - (r_{bM} + L_M)^2 \end{vmatrix}_{N \times 1}; \quad (9)$$

d – сумма векторов значений бистатистических дальностей r и базы l :

$$d = r + l = \begin{vmatrix} r_{b1} + L_1 \\ \dots \\ r_{bM} + L_M \end{vmatrix}_{N \times 1}. \quad (10)$$

Исходя из того, что выражение (7) является линейным с двумя переменными x и R_r , и полагая, что расстояние от приемной позиции до цели R_r уже известно, то решение для координат местоположения цели x :

$$x = (S^T S)^{-1} S^T z + (S^T S)^{-1} S^T d R_r. \quad (11)$$

Следует определить R_r , чтобы выражение (11) было решено. Для этого вводятся дополнительные переменные:

$$a = (S^T S)^{-1} S^T z; \quad (12)$$

$$b = +(S^T S)^{-1} S^T d. \quad (13)$$

Тогда

$$x = a + b R_r. \quad (14)$$

Далее выразив $x^T x = \|x\|^2 = R_r^2$, подставив это выражение в формулу (11), возведя в квадрат, приводим к квадратному уравнению

$$(b^T b - 1) R_r^2 + 2 a^T b R_r + a^T a = 0. \quad (15)$$

Решая это уравнение относительно расстояния от приемника до наблюдаемого объекта R_r , получаем

$$R_r = \frac{-a^T b \pm \sqrt{(a^T b)^2 - (b^T b - 1) a^T a}}{b^T b - 1}.$$

Определив R_r и подставив значение в формулу (11), можно определить координаты местоположения объекта x .

Заключение

В статье рассмотрены различные схемы построения активной многопозиционной РЛС, позиции которой в целях увеличения дальности обнаружения малогабаритных БПЛА и ДПЛА располагаются на аэростатах (дирижаблях). Приведена предполагаемая структурная схема построения многопозиционной полуактивной РЛС. В случае расположения аэростатов (дирижаблей) в определенной области пространства позволяет применить несколько схем построения непозиционной РЛС – «несколько передатчиков – одна позиция приема», «один передатчик – несколько позиций приема», «несколько позиций передатчиков – несколько позиций приема».

В качестве метода определения координат цели для обнаружения БПЛА описан разностно-дальномерный метод с несколькими передатчиками на привязных аэростатах и приемной позицией, расположенной на земле.

Список литературы

1. Кондратьев А. Перспективы развития и применения беспилотных и роботизированных средств вооруженной борьбы в ВС ведущих зарубежных стран // Зарубежное военное обозрение. 2011. № 5. С. 14–21.
2. Юрков Н. К., Полтавский А. В. Отбор операторов автоматизированных рабочих мест многофункциональным комплексам беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 1. С. 70–76. doi: 10.21685/2307-4205-2019-1-8
3. Ильинский Н. Б., Абзалилов Д. Ф. Математические проблемы проектирования крыловых профилей. Казань : Казанский университет, 2011. 284 с.
4. Лопота А. В., Николаев А. Б. Беспилотные летательные аппараты. М. : Государственный научный центр Российской Федерации ЦНИИ робототехники и технической кибернетики, 2015. 18 с.
5. Балык В. М., Комягин В. А. Надежность и эффективность двухсредных ЛА : учеб. пособие. М. : Изд-во МАИ, 2005. 160 с.
6. Reznik S. V., Prosuntsov P. V., Azarov A. V. Substantiation of the structural-layout scheme of the mirror-space-antenna reflector with a high shape stability and a low density per unit length // Journal of engineering physics and thermophysics. 2015. Vol. 88, № 3. P. 699–705. doi: 10.1007/s10891-015-1239-x
7. Годунов А. И., Шишков С. В., Юрков Н. К. Комплекс обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 2. С. 62–70.
8. Полтавский А. В., Жумабаева А. С., Бикеев Р. Р. Имитационное моделирование характеристик комплекса беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 4. С. 16–23.
9. Полтавский А. В., Юрков Н. К., Семенов С. С. Информатизация образования: семантика термина «беспилотный летательный аппарат» // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2018. Т. 1. С. 301–302.
10. Балык В. М., Игнатьев И. Н., Кулакова Р. Д. [и др.]. Выбор оптимальных законов управления летательным аппаратом по аппроксимирующим алгоритмам // Сборник тезисов докладов XXX Чтений К. Э. Циолковского. Калуга, 2003. Часть II. С. 79–80.
11. Балык В. М. Статистический синтез проектных решений при разработке сложных систем. М. : Изд-во МАИ, 2011. 280 с.
12. Бецов А. В., Прокопьев И. В. Анализ живучести беспилотного летательного аппарата // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 2. С. 3–6.
13. Бархатов А. В., Веремьев В. И., Ковалев Д. А. [и др.]. Радиолокация по сигналам сторонних источников. Ч. 1: Современное состояние // Инновации. 2013. № 9. С. 114–119.
14. Нгуен Ван Куан, Маркелова М. А., Веремьев В. И. Анализ возможности использования спутниковых сигналов подсвета для пассивной радиолокационной системы // Вестник Новгородского государственного ун-та. Сер.: Технические науки. 2019. № 4. С. 86–91.
15. Черняк В. С. Многопозиционная радиолокация. М. : Радио и связь, 1993. 416 с.
16. Бакулев П. А. Радиолокационные системы : учебник для вузов. М. : Радиотехника, 2004. 320 с.
17. Нгуен Ван Куан. Мониторинг судоходства в прибрежных морских районах полуактивной радиолокационной системы с использованием сигналов подсвета спутникового базирования // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2022. № 25. С. 6–16.
18. Юрков Н. К., Жумабаева А. С., Полтавский А. В. Алгоритм определения индикатрисы излучения подвижного объекта на примерах робототехнического комплекса беспилотных летательных аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 3. С. 23–30.

References

1. Kondrat'ev A. Prospects for the development and application of unmanned and robotic means of military warfare in the armed forces of leading foreign countries. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie = Foreign Military Review*. 2011;(5):14–21. (In Russ.)
2. Yurkov N.K., Poltavskiy A.V. Selection of operators of automated workplaces for multifunctional complexes of unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2019;(1):70–76. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2019-1-8
3. Il'inskiy N.B., Abzalilov D.F. *Matematicheskie problemy proektirovaniya krylovykh profiley = Mathematical problems of designing wing profiles*. Kazan': Kazanskiy universitet, 2011:284. (In Russ.)
4. Lopota A.V., Nikolaev A.B. *Bespilotnye letatel'nye apparaty = Unmanned aerial vehicles*. Moscow: Gosudarstvennyy nauchnyy tsentr Rossiyskoy Federatsii TsNII robototekhniki i tekhnicheskoy kibernetiki, 2015:18. (In Russ.)
5. Balyk V.M., Komyagin V.A. *Nadezhnost' i effektivnost' dvukhsrednykh LA: ucheb. posobie = Reliability and efficiency of two-medium aircraft : textbook*. Moscow: Izd-vo MAI, 2005:160. (In Russ.)

6. Reznik S.V., Prosuntsov P.V., Azarov A.V. Substantiation of the structural-layout scheme of the mirror-space-antenna reflector with a high shape stability and a low density per unit length. *Journal of engineering physics and thermophysics*. 2015;88(3):699–705. doi: 10.1007/s10891-015-1239-x
7. Godunov A.I., Shishkov S.V., Yurkov N.K. Complex of detection and control of small-sized unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2014;(2):62–70. (In Russ.)
8. Poltavskiy A.V., Zhumabaeva A.S., Bikeev R.R. Simulation modeling of the characteristics of a complex of unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(4):16–23. (In Russ.)
9. Poltavskiy A.V., Yurkov N.K., Semenov S.S. Informatization of education: semantics of the term "unmanned aerial vehicle". *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2018;1:301–302. (In Russ.)
10. Balyk V.M., Ignat'ev I.N., Kulakova R.D. et al. The choice of optimal aircraft control laws by approximating algorithms. *Sbornik tezisev dokladov KhKhKh Chteniy K. E. Tsiolkovskogo = Collection of abstracts of the XXX Readings of K.E. Tsiolkovsky*. Kaluga, 2003;Part P.C.:79–80. (In Russ.)
11. Balyk V.M. *Statisticheskii sintez proektnykh resheniy pri razrabotke slozhnykh system = Statistical synthesis of design solutions in the development of complex systems*. Moscow: Izd-vo MAI, 2011:280. (In Russ.)
12. Betskov A.V., Prokop'ev I.V. Analysis of the survivability of an unmanned aerial vehicle. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2014;(2):3–6. (In Russ.)
13. Barkhatov A.V., Verem'ev V.I., Kovalev D.A. et al. Radar based on signals from third-party sources. Part 1: Current state. *Innovatsii = Innovations*. 2013;(9):114–119. (In Russ.)
14. Nguen Van Kuan, Markelova M.A., Verem'ev V.I. Analysis of the possibility of using satellite illumination signals for a passive radar system. *Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo un-ta. Ser.: Tekhnicheskie nauki = Bulletin of the Novgorod State University. Ser.: Technical Sciences*. 2019;(4):86–91. (In Russ.)
15. Chernyak V.S. *Mnogopozitsionnaya radiolokatsiya = Multi-position radar*. Moscow: Radio i svyaz', 1993:416. (In Russ.)
16. Bakulev P.A. *Radiolokatsionnye sistemy: uchebnik dlya vuzov = Radar systems : textbook for universities*. Moscow: Radiotekhnika, 2004:320. (In Russ.)
17. Nguen Van Kuan. Monitoring of navigation in coastal marine areas of a semi-active radar system using satellite-based illumination signals. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy Rossii. Radioelektronika = Proceedings of higher educational institutions of Russia. Radio electronics*. 2022;(25):6–16. (In Russ.)
18. Yurkov N.K., Zhumabaeva A.S., Poltavskiy A.V. Algorithm for determining the radiation indicatrix of a mobile object on examples of a robotic complex of unmanned aerial vehicles. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2015;(3):23–30. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Антон Иванович Мельничук

инженер группы обслуживания и ремонта бортовой контрольно-записывающей аппаратуры,
Учебная авиационная база Краснодарского
высшего военного авиационного училища летчиков
имени Героя Советского Союза
А. К. Серова МО РФ,
(Россия, Саратовская обл., г. Ртищево,
ул. Котовского, 1/1)
E-mail: pelmenio@mail.ru

Николай Владимирович Горячев

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

Anton I. Mel'nichuk

Engineer of the service and repair group
of on-board recording equipment,
Training Aviation Base of the Krasnodar
Higher Military Aviation School of Pilots
named after Hero of the Soviet Union
A.K. Serov of Russian Ministry of Defense
(1/1 Kotovskogo street, Rtishchevo,
Saratov Region, Russia)

Nikolay V. Goryachev

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

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

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 17.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 17.01.2022

Принята к публикации/Accepted 15.02.2022

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ОПЕРАТОРОВ ЭВОЛЮЦИИ И ВНУТРЕННЕГО ВРЕМЕНИ В ТЕОРИИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СИСТЕМ С ДЛИТЕЛЬНЫМИ СРОКАМИ АКТИВНОГО СУЩЕСТВОВАНИЯ

В. А. Острейковский¹, А. В. Сорочкин²

^{1,2} Сургутский государственный университет, Сургут, Россия
¹ academicostr@yandex.ru, ² sorochkin_av@surgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Современные и проектируемые сложные, высокоопасные и критически важные системы уже сегодня должны выполнять свой функционал 30–50 и более лет (ядерная энергетика, космонавтика, транспортные системы, в том числе магистральные трубопроводы нефти и газа). Поэтому для подобных комплексов чрезвычайно важно заранее знать показатели долговечности (ресурс, срок службы и их остаточные значения) и, следовательно, уметь оценивать их значения путем анализа функции распределения состояния ρ в любой момент времени применения по назначению. Цель статьи – исследование зависимостей показателей долговечности с применением современных методов функционального анализа. *Материалы и методы.* Спектральные преобразования операторов эволюции и внутреннего времени систем, статистические методы теории надежности. *Результаты и выводы.* Проанализированы спектральные преобразования операторов Лиувилля и внутреннего времени, а также физическая сущность перехода исследований из гильбертова пространства к оснащенным пространствам.

Ключевые слова: необратимость, неустойчивые системы, операторы эволюции и внутреннего времени, долговечность, ресурс, срок службы

Для цитирования: Острейковский В. А., Сорочкин А. В. Математическое моделирование спектрального представления операторов эволюции и внутреннего времени в теории долговечности систем с длительными сроками активного существования // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 42–48. doi:10.21685/2307-4205-2022-3-5

MATHEMATICAL MODELING OF THE SPECTRAL REPRESENTATION FOR EVOLUTION OPERATORS AND INTERNAL TIME IN THE THEORY OF DURABILITY OF SYSTEMS WITH LONG PERIODS OF ACTIVE EXISTENCE

V.A. Ostreykovskiy¹, A.V. Sorochkin²

^{1,2} Surgut State University, Surgut, Russia
¹ academicostr@yandex.ru, ² sorochkin_av@surgu.ru

Abstract. *Background.* Modern and designed complex, highly dangerous and critical systems today should fulfill their functionality for 30–50 years or more (nuclear power, cosmonautics, transport systems, including oil and gas trunk pipelines). Therefore, for such complexes it is extremely important to know the durability indicators in advance (resource, service life and their residual values) and, therefore, be able to evaluate their values by analyzing the distribution function of the state ρ at any time of the intended use. The purpose of the article is to study the dependences of durability indicators using modern methods of functional analysis. *Materials and methods.* Spectral transformations of operators of evolution and internal time of systems, statistical methods of reliability theory. *Results and conclusions.* The spectral transformations of the Liouville and internal time operators are analyzed, as well as the physical essence of the transition of studies from the Hilbert space to the equipped spaces.

Keywords: irreversibility, unstable systems, evolution and internal time operators, longevity, resource, service life

For citation: Ostreykovskiy V.A., Sorochkin A.V. Mathematical modeling of the spectral representation for evolution operators and internal time in the theory of durability of systems with long periods of active existence. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(3):42–48. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-3-5

Введение

Известно [1, 2], что хаотические отображения служат простейшими системами, порождающими необратимые процессы. При этом в этих работах обосновывается, каким образом возможно обобщение классической и квантовой механики в случае неустойчивости динамических систем, а именно: нарушение эквивалентности между индивидуальным описанием на уровне траекторий и статистическим, на уровне ансамбля. Это чрезвычайно важно, и для объяснения влияния чувствительности к начальным условиям для ходических систем и доказано, что две траектории, выходящие из сколь угодно близких начальных точек, со временем экспоненциально расходятся [3, 4]. Здесь необходимо подчеркнуть, что в случае решения задач долговечности на статистическом уровне подобные вопросы отсутствуют. Но имеются, к сожалению, другие, а именно: в хаотических отображениях исследователи обычно имеют дело с небольшим числом неизвестных переменных, в частности для сдвига Бернулли оно равно единице, а для преобразования – двум.

Далее, в работах [1, 2], также строго доказано, что если решается статистическая задача динамики, то прежде всего необходимо наблюдать за изменением функции распределения состояния объекта $\rho(y)$ под действием оператора эволюции U на функцию

$$\rho_{n+1}(y) = U\rho_n(y), \quad (1)$$

в моменты $\rho = f(t)$ времени t .

Известно, что существуют такие функции $\rho(y; t)$, которые инварианты в условиях действия оператора U , а именно собственные функции оператора.

Из теории операторов также известно, что значения собственных функций и собственных значений оператора зависят от типа функционального пространства. Поэтому включение необратимости при исследовании долговечности структурно и функционально сложных динамических систем (СФСС) требует перехода от «хороших» функций (вида x или $\sin x$) распределения гильбертова пространства к сингулярным обобщенным функциям более широкого класса пространств типа пространства Гельфанда, так как эквивалентность между индивидуальным (по траекториям) и статистическим (по ансамблям) описаниями нарушается [1].

Другими словами, из выражения (1) для Гильбертова пространства следует

$$U^{n_1+n_2} = U^{n_1}U^{n_2}, \quad (2)$$

при любых знаках показателей n_1 и n_2 (знак «плюс» соответствует будущему $n > 0$, а знак «минус» прошлому $n < 0$), т.е. существуют два различных спектральных представления: одно для будущего, другое для прошлого (динамическая группа делится на две подгруппы). И, следовательно, необходимо выбрать ту подгруппу, равновесие в которой достигается в будущем, ибо все необратимые процессы во времени ориентированы в одном направлении – в будущее в соответствии со стрелой времени.

Таким образом, чрезвычайно важным является вопрос об адекватном выборе вида спектрального преобразования операторов, именно на это решение задачи и направлена данная статья.

Спектральные преобразования оператора Лиувилля

Оператор Лиувилля относится к классу операторов, описывающих эволюцию объектов во времени, т.е. эволюцию функции распределения состояния объекта во времени ρ в соответствии с уравнением

$$L_\rho = i \frac{\partial \rho}{\partial t}, \quad (3)$$

т.е. изменение $\rho(t)$ получается от действия оператора L на ρ , а L – линейный оператор.

Формальное решение уравнения (2) имеет вид

$$\rho(t) = e^{-iLt}. \quad (4)$$

В задачах теории долговечности СФСС хаотического поведения систем и включения необратимости на статистическом уровне необходимо значение спектрального представления оператора

Лиувилля. Для решения этой задачи требуются знания его собственных функций и собственных значений.

Из теории функционального анализа известно, что спектральные представления зависят от вида функционального пространства для функций, описывающих вероятности состояния $\rho(y; t)$ объекта. Для случая интегрируемых систем эволюция во времени с оператором L существуют в гильбертовом пространстве собственные значения l_n и в соответствии с (3) осцилляторный член равен

$$\exp(itL) = \cos(tl_n) - \sin(tl_n), \quad (5)$$

поэтому и прошлое и будущее играют одинаковую роль.

А для включения в описание необратимости требуются комплексные собственные значения вида

$$l_n = \omega_n - i\Omega_n,$$

для того, чтобы обеспечить экспоненциальное затухание $e^{-i\Omega_n t}$ эволюции во времени. Тогда такой вклад будет прогрессивно убывать в будущем (при $t > 0$) и возрастать в прошлом (при $t < 0$). Следовательно (как вывод), симметрия во времени для такого случая нарушается и получение комплексных собственных значений оператора возможно выполнить, лишь выйдя из гильбертова пространства.

Здесь следует подчеркнуть важность разницы в описании систем во времени на уровне траекторий и ансамблей в исследованиях долговечности (что часто делают ошибочно), а не функций распределения $\rho(y; t)$.

Сущность причин перехода от гильбертова пространства к оснащенным пространствам в задачах спектрального представления операторов

Для решения этой задачи необходимо оценить незатухающие взаимодействия в природе. При этом в первую очередь рассматривать систему как единое целое из большого числа входящих в нее элементов с позиций сингулярности функций распределения $\rho(t)$.

В главе 5 (разделы III–VI, с. 102–113) [1] И. Р. Пригожин рассматривает различие между незатухающим и переходными взаимодействиями на примерах классической динамики и термодинамики. В частности, предлагается следующий подход, называемый «иерархией ценностей», который состоит в следующей последовательности шагов:

- 1) использование «термодинамического предела»;
- 2) применение классической теории рядов (или интервалов) Фурье;
- 3) расширение понятия необратимости как прямого аналога процесса старения, как основного фактора в теории долговечности.

В теории систем для описания взаимодействий оперируют двумя разновидностями функций распределения – локализованными и делокализованными. Локализованные функции распределения существуют на конечном отрезке прямой, а делокализованные – на всей прямой. И те, и другие функции оценивают различные состояния систем. Так, локализованные функции описывают в основном переходные взаимодействия элементов в системе, а делокализованные – по всей прямой – незатухающие взаимодействия. Таким образом, особенно в макроскопических системах, исследователи имеют дело с делокализованными функциями распределения. Локализованные функции распределения связаны с траекториями поведения элементов систем, а для описания незатухающих взаимодействий в твердых телах и в газах используется понятие «термодинамический предел», где

N – число элементов и V – объем, и отношение $\frac{N}{V}$ остается постоянным (состояние материи и фазовые переходы). Термодинамический предел позволяет провести различие между равновесными состояниями и неравновесными.

В главе 5 [1] строго доказано, что сингулярные функции (4) в динамическом описании систем играют главную роль, так как делокализованные функции распределения являются главными составляющими в описании незатухающих взаимодействий. Поэтому возникает необходимость в сингулярных функциях при динамическом описании систем. Именно этот фактор требует от исследователей понижать гильбертово пространство и использовать оснащенные пространства. Кроме этого, так как уже равновесные распределения, являющиеся функциями распределения гамильтониана,

лежат за пределами гильбертова пространства, то не возникает вопросов использования оснащенных пространств.

И последнее. Из-за того, что необратимые процессы являются главным фактором в теории долговечности систем, то чрезвычайно интересны образные сравнения понятия необратимости как аналога процесса старения, приведенное Нобелевским лауреатом И. Р. Пригожиным: «В нашей временной шкале атомы, из которых состоят наши тела, бессмертны. В этом смысле старение – свойство популяций, а не индивидов. Это утверждение верно и применительно к неодушевленному миру» [1, с. 113].

Спектральные представления оператора внутреннего времени

В 1978 г. Б. Мистра, продолжив дальше исследования школы А. Н. Колмогорова (К-поток теории КАМ), В. И. Арнольда и Ю. К. Мозера [6–8] влияния резонансов на траектории состояния динамических систем, доказал, что в случае K -поток линейному оператору Лиувилля L соответствует сопряженный оператор внутреннего времени T вида коммутатора

$$-i[L, T] = -i(LT - TL) = 1, \quad (6)$$

где 1 – единичный оператор, или

$$U_t^T T U_t = T + t * 1, \quad (7)$$

где оператор эволюции

$$U = e^{-iLt}. \quad (8)$$

Если выражения (6) и (7) справедливы, то физический смысл оператора T очень простой (как вывод): оператор T – нелокальный оператор для сильно неустойчивых систем, реализующий новое описание классической динамики. А дальше все становится ясным. Как доказано в работе [2]: полная система собственных функций оператора T является суммой всех возможных конечных произведений функций χ_n

$$\chi_n = U^n \chi_0, \quad (9)$$

и любое такое произведение из формулы (9) соответствует собственному значению m оператора T , причем m – наибольший из индексов n .

Так как

$$T\chi = n\chi_n, \quad (10)$$

то χ_n – значение собственной функции оператора T , соответствующее «возрасту» n .

Из любого учебника по функциональному анализу известно, что всякая функция распределения состояний системы ρ может иметь разложение по собственным функциям $\{1, \varphi_n\}$

$$\rho = 1 + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n \varphi_n, \quad (11)$$

т.е. выражение (11) позволяет получить полную систему собственных функций оператора T по всем возможным конечным произведениям функций χ_n . Причем если известна точная локализация системы, то функция ρ имеет вид δ -функции

$$\rho = \delta_{m_0}(x, y) = \delta(x - x_0) \delta(y - y_0) = 1 + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \varphi_n(x_0, y_0) L_n(x, y), \quad (12)$$

где x и y – оси координат.

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- 1) в формулу (12) входят с равными весами все «возрасты» системы;
- 2) получена новая дополнительность между двумя свойствами описания системы: а) на языке точек в фазовом пространстве состояний системы и б) на языке «разбиений», соответствующим различным внутренним «возрастам» системы;
- 3) понятие «внутренний возраст» свидетельствует о новом нелокальном описании динамических систем.

Можно добавить к этим трем выводам еще два дополнения:

4) функция распределения состояния системы $\rho(t)$ имеет «нулевой возраст» при $\chi = \chi_0$;

5) если по сравнению с равномерным равновесным распределением имеем избыток $\bar{\rho}$, равный

$$\bar{\rho} = \rho - 1 = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n \varphi_n, \quad (13)$$

то имеет место быть чрезвычайно важная формула

$$T_\rho = \frac{\bar{\rho}, T\bar{\rho}}{\bar{\rho}, \bar{\rho}}, \quad (14)$$

утверждающая, что каждому состоянию ρ системы возможно сопоставлять средний возраст T_ρ .

Если учесть ортонормированность функции L_n и (6), то выражение (14) можно представить в виде

$$T_\rho = \frac{\sum n c_n}{\sum c_n^2} = n. \quad (15)$$

В этом случае в соответствии с формулой (7) имеем

$$T_\rho = T_{\rho_0} + t, \quad (16)$$

и вывод: средний возраст состояния системы изменяется адекватно с внутренним временем или с обычным внешним временем.

Заключение

Два последних столетия, XIX и XX вв., характеризуются большими достижениями в исследовании нового направления в термодинамике – разработкой закономерностей в описании законов хаоса динамических систем. Однако вместе с этим следует отметить, что эти исследования имеют и ограниченное применение, так как основаны на разработке хаотических отображений сравнительно узкого класса систем с небольшим числом независимых переменных, равных всего минус единице – для сдвига Бернулли и двум – для преобразования пекаря.

Таким образом, для получения значений показателей долговечности (ресурса, срока, службы и их остаточных значений) в данный момент времени необходимо знать аналитический вид функций распределения ρ анализируемого объекта и спектральные представления операторов [9–11].

Из содержания статьи целесообразно сделать следующие выводы:

1. Необратимые процессы и неустойчивость являются главными факторами появления понятия «внутреннего времени» как источника нелокальности сложных систем в условиях их применения по назначению.

2. Возраст систем зависит не только от срока службы (ресурса) «слабого звена», хотя и наиболее важного в системе, а от средней обобщенной оценки, относящейся ко всем частям системы.

3. Вызывает серьезные опасения адекватность оценки долговечности сложной критически важной системы по статистическим данным наблюдения за траекториями (и даже ансамблями) наиболее важных (с определенной точки зрения) частей системы.

4. Чрезвычайно важным также является заблуждение относительно одинаковости течения времени в прошлом, настоящем и будущем систем с длительными сроками активного существования и, следовательно, и вычисленными значениями ресурса, срока службы и их остаточных величин, при отмеченных выше особенностях фактора асимметрии времени.

Список литературы

1. Пригожин И. Конец определенности. Время, хаос и новые законы природы. Ижевск : Ижевская республиканская типография, 1999. 216 с.
2. Пригожин И. От существующего к возникающему: Время и сложность в физических науках. Изд. 2-е, доп. М. : Едиториал, УРСС. 2002. 288 с.
3. Ляпунов А. М. Общая задача об устойчивости движения. М. ; Л. : ОНТИ, 1935.

4. Ляпунов А. М. Собрание сочинений. М. ; Л., 1956. Т. 2. 263 с.
5. Денисова Т. Ю., Острейковский В. А. Онтология феномена времени в теории прогнозирования техногенного риска сложных динамических систем : монография. Сургут : Печатный мир, 2017. 253 с.
6. Колмогоров А. И. Об аналитических методах в теории вероятности // Успехи математических наук. 1938. № 5. С. 5–41.
7. Арнольд В. И. Особенности, бифуркации и катастрофы // Успехи физических наук. 1983. Т. 141. С. 569–590.
8. Мозер Ю. К. Регулярная и стохастическая динамика. М. : Мир, 1984.
9. Острейковский В. А., Шевченко Е. Н. Математическое моделирование эффекта асимметрии внутреннего времени в теории долговечности структурно и функционально сложных критически важных систем // Итоги науки : избр. тр. Междунар. симп. по фундаментальным и прикладным наукам. М. : РАН, 2018. Вып. 37. С. 69–111.
10. Острейковский В. А., Лысенкова С. А., Шевченко Е. Н. О методе применения оператора внутреннего времени в задачах обоснования долговечности сложных динамических систем // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 4. С. 31–41.
11. Острейковский В. А., Лысенкова С. А., Недорезов В. Г., Юрков Н. К. Концептуальные основы обоснования применения операторов эволюции микроскопической энтропии, преобразования и внутреннего времени в теории долговечности структурно и функционально сложных систем // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 17–30.

References

1. Prigozhin I. *Konets opredelennosti. Vremya, khaos i novye zakony prirody = The end of certainty. Time, chaos and new laws of nature.* Izhevsk: Izhevskaya respublikanskaya tipografiya, 1999:216. (In Russ.)
2. Prigozhin I. *Ot sushchestvuyushchego k voznikayushchemu: Vremya i slozhnost' v fizicheskikh naukakh. Izd. 2-e, dop = From the existing to the emerging: Time and complexity in the Physical sciences. 2nd ed., add.* Moscow: Editorial, URSS. 2002:288. (In Russ.)
3. Lyapunov A.M. *Obshchaya zadacha ob ustoychivosti dvizheniya = The general problem of motion stability.* Moscow; Leningrad: ONTI, 1935. (In Russ.)
4. Lyapunov A.M. *Sobranie sochineniy = Collected works.* Moscow; Leningrad, 1956;2:263. (In Russ.)
5. Denisova T.Yu., Ostreykovskiy V.A. *Ontologiya fenomena vremeni v teorii prognozirovaniya tekhnogennogo riska slozhnykh dinamicheskikh sistem: monografiya = Ontology of the phenomenon of time in the theory of forecasting technogenic risk of complex dynamic systems : monograph.* Surgut: Pechatnyy mir, 2017:253. (In Russ.)
6. Kolmogorov A.I. On analytical methods in probability theory. *Uspekhi matematicheskikh nauk = Successes of mathematical sciences.* 1938;(5):5–41. (In Russ.)
7. Arnol'd V.I. Features, bifurcations and catastrophes. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Successes of physical sciences.* 1983;141:569–590. (In Russ.)
8. Mozer Yu.K. *Regulyarnaya i stokhasticheskaya dinamika = Regular and stochastic dynamics.* Moscow: Mir, 1984. (In Russ.)
9. Ostreykovskiy V.A., Shevchenko E.N. Mathematical modeling of the effect of internal time asymmetry in the theory of durability of structurally and functionally complex critical systems. *Itogi nauki: izbr. tr. Mezhdunar. simp. po fundamental'nyim i prikladnym naukam = Results of science : elected tr. International. simp. on fundamental and applied sciences.* Moscow: RAN, 2018;(37):69–111. (In Russ.)
10. Ostreykovskiy V.A., Lysenkova S.A., Shevchenko E.N. On the method of using the internal time operator in the problems of substantiating the durability of complex dynamic systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2020;(4):31–41. (In Russ.)
11. Ostreykovskiy V.A., Lysenkova S.A., Nedorezov V.G., Yurkov N.K. Conceptual foundations for substantiating the use of operators of the evolution of microscopic entropy, transformation and internal time in the theory of durability of structurally and functionally complex systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(1):17–30. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владислав Алексеевич Острейковский
 доктор технических наук, профессор,
 профессор кафедры информатики
 и вычислительной техники,
 Сургутский государственный университет
 (Россия, г. Сургут, просп. Ленина, 1)
 E-mail: academicotr@yandex.ru

Vladislav A. Ostreykovskiy
 Doctor of technical sciences, professor,
 professor of the sub-department of information theory
 and computer technology,
 Surgut State University
 (1 Lenin avenue, Surgut, Russia)

Андрей Викторович Сорочкин

аспирант,

Сургутский государственный университет

(Россия, г. Сургут, просп. Ленина, 1)

E-mail: sorochkin_av@surgu.ru

Andrey V. Sorochkin

Postgraduate student,

Surgut State University

(1 Lenin avenue, Surgut, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 16.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 14.01.2022

Принята к публикации/Accepted 14.02.2022

МАРКОВСКАЯ МОДЕЛЬ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СЛОЖНОЙ ТЕХНИКИ

М. А. Сивопляс

Филиал Военной академии ракетных войск стратегического назначения
имени Петра Великого (г. Серпухов), Серпухов, Московская обл., Россия
cozaks@bk.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Проведение технического обслуживания – один из важнейших этапов эксплуатации, который направлен на поддержание и при необходимости восстановление исправного состояния. Однако в практике обслуживания сложной и потенциально опасной техники известны случаи нерегламентированного воздействия персоналом на объект технического обслуживания, которые могут привести к проявлению опасных свойств. Таким образом, возникает необходимость разработки математического аппарата оценки вероятностей состояний безопасности технического обслуживания потенциально опасной сложной техники. *Материалы и методы.* Приводится обоснование применимости марковской модели для математического моделирования безопасности процесса технического обслуживания. *Результаты.* На основании разработанной модели составлена и решена аналитически система дифференциальных уравнений Колмогорова расчета вероятностей безопасности процесса технического обслуживания. *Выводы.* Таким образом, аналитические зависимости вероятностей безопасности процесса технического обслуживания позволяют оценить и спрогнозировать совершение нерегламентированного воздействия на потенциально опасную сложную технику в процессе технического обслуживания.

Ключевые слова: безопасность технического обслуживания, марковский процесс, система уравнений Колмогорова, интенсивность совершения ошибки

Для цитирования: Сивопляс М. А. Марковская модель безопасности технического обслуживания сложной техники // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 49–53. doi:10.21685/2307-4205-2022-3-6

THE MARKOV MODEL OF SAFETY OF MAINTENANCE OF COMPLEX EQUIPMENT

M.A. Sivoplyas

Branch Military Academy of Strategic Missile Forces
named after Peter the Great (Serpukhov), Serpukhov, Moscow region, Russia
cozaks@bk.ru

Abstract. *Background.* Maintenance is one of the most important stages of operation, which is aimed at maintaining and, if necessary, restoring serviceable condition. However, in the practice of servicing complex and potentially dangerous equipment, there are cases of unregulated exposure by personnel to the maintenance facility, which can lead to the manifestation of dangerous properties. Thus, there is a need to develop a mathematical apparatus for assessing the probabilities of safety conditions of maintenance of potentially dangerous complex equipment. *Materials and methods.* The presented article provides a justification for the applicability of the Markov model for mathematical modeling of the safety of the maintenance process. *Results.* Based on the developed model, a system of Kolmogorov differential equations for calculating the probabilities of the safety of the maintenance process has been compiled and solved analytically. *Conclusions.* Thus, the analytical dependences of the probabilities of the safety of the maintenance process make it possible to assess and predict the commission of an unregulated impact on potentially dangerous complex equipment during maintenance.

Keywords: maintenance safety, Markov process, Kolmogorov equation system, error intensity

For citation: Sivoplyas M.A. The Markov model of safety of maintenance of complex equipment. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(3):49–53. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-3-6

Актуальность и цели

Техническое обслуживание (ТО) является неотъемлемым этапом эксплуатации сложной техники. Оно проводится квалифицированным персоналом в определенном объеме, установленном в

документации на объект, и обычно включает контроль технического состояния объекта ТО, устранение выявленных при контроле технического состояния отказов, мероприятия, направленные на предупреждение возможных отказов, работы, обеспечивающие готовность объекта ТО к использованию по назначению, оформление документов. Во время выполнения работ персонал взаимодействует с функциональными элементами объекта ТО, поэтому всякое действие, непредусмотренное документацией на проведение ТО, потенциально может привести к опасному состоянию техники и характеризуется вероятностью совершения ошибочного действия персоналом.

Материалы и методы

Состояние безопасности процесса ТО зависит от безопасности объекта [1]. Так, безопасностью техники является состояние специально придаваемой ей на этапе создания и разработки, которое в сочетании с комплексом организационно-технических мер на всех стадиях жизненного цикла обеспечивает исключение или снижение до допустимого уровня возможности проявления опасности.

Как правило, действиями персонала при работе со сложной техникой руководит более подготовленный и опытный работник. Основной задачей руководителя является проведение работ в строгом соответствии с методиками, описанными в документации, а также своевременное принятие мер по предотвращению ошибочных действий персонала. Действие персонала во время ТО сложной техники характеризуется некоторым множеством параметров, оценив которые, руководитель прогнозирует дальнейшее действие и делает вывод о его правильности [2]. Таким образом, руководитель выступает в роли контролирующего звена в системе технического обслуживания, которому свойственны ошибки первого и второго рода. Именно ошибка второго рода способствует совершению ошибочного действия персоналом во время выполнения операции.

С целью прогнозирования и оценки безопасности проведения ТО сложной техники в описанных выше условиях разработана модель процесса ТО. Основными допущениями в моделировании процесса являются: 1) вероятность совершения ошибочного действия персоналом > 0 , 2) всякое ошибочное действие персонала приводит к опасному состоянию процесса ТО, 3) потоки событий процесса ТО являются стационарными, т.е. их характеристики не зависят от времени.

В процессе ТО сложной техники выделены состояния безопасности.

- Безопасное состояние характеризуется регламентированным проведением ТО. Во время проведения ТО персонал выполняет действия согласно документации ТО, при этом не исключается ошибочное действие.

- Потенциально опасное состояние, при котором ошибочное действие не допущено, однако есть предпосылки к его совершению, которые могут проявляться в различных формах. К примеру, психофизическое состояние персонала соответствует неуверенным действиям либо знания, умения и навыки персонала не позволяют персоналу уверенно правильно выполнить действие и т.д. Если руководитель ТО делает верный вывод о потенциально опасном состоянии ТО, тогда он предпринимает корректирующие действия, которые переводят систему в безопасное состояние.

- Если руководитель совершает ошибку второго рода и делает неверное заключение о состоянии безопасности процесса ТО, тогда после совершения ошибочного действия система переходит в опасное состояние. Опасное состояние характеризуется негативными последствиями совершенного ошибочного действия персонала во время ТО. Описанные состояния ТО и события перехода между состояниями изображены графом состояний на рис. 1.

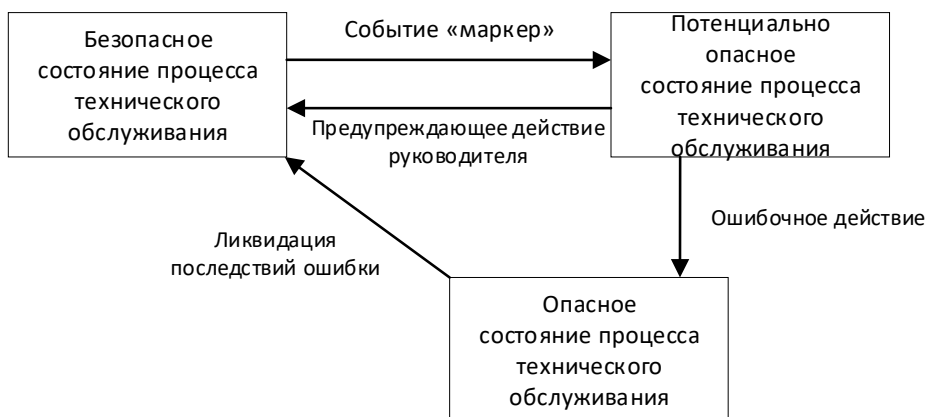


Рис. 1. Граф состояний процесса технического обслуживания

Описанный процесс проведения ТО с учетом введенных допущений является марковским. Процесс ТО является случайным, и для любого момента времени вероятностные характеристики процесса технического обслуживания в будущем зависят только от его состояния в данный момент времени и не зависят от того, когда и как система пришла в это состояние.

Каждое состояние процесса ТО характеризуется вероятностью, а в совокупности они образуют полную группу несовместных состояний:

$$P_{\text{бс}} + P_{\text{пос}} + P_{\text{о}} = 1,$$

где $P_{\text{бс}}$ – вероятность безопасного состояния процесса ТО; $P_{\text{пос}}$ – потенциально опасное состояние; $P_{\text{о}}$ – опасное состояние.

Потоки событий процесса ТО изменяют состояние безопасности и являются простейшими с учетом допущения (обладают свойствами стационарности, если его характеристики не зависят от времени; ординарности, если события появляются по одиночке; не имеют последствий, если для любых двух непересекающихся участков времени число событий, попадающих на один из них, не зависит от того, сколько событий попало на другой) [3].

Важной характеристикой потока событий является интенсивность, значение которых обозначены как α_1 – интенсивность событий «маркер», α_2 – интенсивность событий совершения ошибочного действия, μ_1 – интенсивность событий корректировки руководителем действий персонала, μ_2 – интенсивность событий последствий ошибочных действий персонала.

Интенсивность события «маркер», а также события совершения ошибочного действия зависят от качеств персонала, который выполняет действия. К таким качествам относятся знания, умения и навыки выполнения работ, психологическое и физиологическое состояния человека и др. Интенсивность события корректировки руководителем действий персонала характеризует руководителя, участвующего в ТО сложной техники, его квалификации и опыта руководства ТО и выполнения действий, также психологического, физиологического состояния и др.

Для описанного процесса ТО составлены уравнения Колмогорова, которые позволяют найти функции вероятностей состояний процесса ТО от времени:

$$\begin{cases} \frac{dP_{\text{бс}}}{dt} = P_{\text{пос}}\mu_1 + P_{\text{о}}\mu_2 - P_{\text{бс}}\alpha_1, \\ \frac{dP_{\text{пос}}}{dt} = P_{\text{бс}}\alpha_1 - P_{\text{пос}}(\mu_1 + \alpha_2), \\ \frac{dP_{\text{о}}}{dt} = P_{\text{пос}}\alpha_2 - P_{\text{о}}\mu_2. \end{cases} \quad (1)$$

В начальный момент времени ($t = 0$) ТО имеет безопасное состояние, поскольку на обслуживаемую технику не было оказано нерегламентированного воздействия. Следовательно, на основе системы уравнений (1) формулируется задача Коши, исходные данные которой – $P_{\text{бс}}(0) = 1$, $P_{\text{пос}}(0) = P_{\text{о}}(0) = 0$.

Получено аналитическое решение, представленное ниже. Значение параметра D , который рассчитывается по формуле (2), влияет на зависимость вероятности состояний безопасности ТО сложной техники от времени:

$$D = (\mu_1 + \alpha_2 + \mu_2 + \alpha_1)^2 + 4(\mu_1\alpha_1 - \mu_2(\mu_1 + \alpha_2) - \mu_2\alpha_1 - \alpha_1(\mu_1 + \alpha_2)). \quad (2)$$

Если $D > 0$, то

$$\begin{aligned} P_{\text{бс}}(t) &= \frac{1}{\alpha_1} \left[C_1(k1 + \mu_1 + \alpha_2)e^{tk1} + C_2(k2 + \mu_1 + \alpha_2)e^{tk2} + A(\mu_1 + \alpha_2) \right], \\ P_{\text{пос}}(t) &= C_1e^{tk1} + C_2e^{tk2} + A, \\ P_{\text{о}}(t) &= 1 - \frac{k1 + \mu_1 + \alpha_2 + \alpha_1}{\alpha_1} C_1e^{tk1} - \frac{k2 + \mu_1 + \alpha_2 + \alpha_1}{\alpha_1} C_2e^{tk2} - \frac{\mu_1 + \alpha_2 + \alpha_1}{\alpha_1} A, \end{aligned}$$

где

$$C_2 = \frac{\alpha_1 + Ak_1 + A - A(\mu_1 + \alpha_2)}{(k_2 - k_1)},$$

$$C_1 = -\frac{\alpha_1 + Ak_1 + A - A(\mu_1 + \alpha_2)}{(k_2 - k_1)} - A,$$

$$k_1 = \frac{1}{2} \sqrt{(\mu_1 + \alpha_2 + \mu_2 + \alpha_1)^2 - 4(\mu_2\mu_1 + \mu_2\alpha_2 + \mu_2\alpha_1 + \alpha_1\alpha_2)} + \frac{1}{2}(\mu_1 + \alpha_2 + \mu_2 + \alpha_1),$$

$$k_2 = \frac{1}{2} \sqrt{(\mu_1 + \alpha_2 + \mu_2 + \alpha_1)^2 - 4(\mu_2\mu_1 + \mu_2\alpha_2 + \mu_2\alpha_1 + \alpha_1\alpha_2)} - \frac{1}{2}(\mu_1 + \alpha_2 + \mu_2 + \alpha_1),$$

$$A = \frac{\mu_2\alpha_1}{\mu_2\mu_1 + \mu_2\alpha_2 + \mu_2\alpha_1 + \alpha_1\alpha_2}.$$

Если $D = 0$, то

$$P_{\text{noc}}(t) = e^{-0,5t(\mu_1 + \alpha_2 + \mu_2 + \alpha_1)}(C_1 + C_2t) + A,$$

$$P_{\text{6c}}(t) = \frac{1}{\alpha_1}(e^{-0,5t(\mu_1 + \alpha_2 + \mu_2 + \alpha_1)}(C_2 - 0,5(\mu_2 + \alpha_1)(C_1 + C_2t) + 0,5(\mu_1 + \alpha_2)(C_1 + C_2t)) + (\mu_1 + \alpha_2)A),$$

$$P_o(t) = 1 - P_{\text{noc}}(t) - P_{\text{6c}}(t),$$

где

$$A = \frac{\mu_2\alpha_1}{\mu_2\mu_1 + \mu_2\alpha_2 + \mu_2\alpha_1 + \alpha_1\alpha_2},$$

$$C_2 = \alpha_1 - 0,5A(\mu_2 + \alpha_1) + A(\mu_1 + \alpha_2)(\alpha_1 - 0,5),$$

$$C_1 = -A.$$

Если $D < 0$, то

$$P_{\text{noc}}(t) = e^{-0,5tq} \left(C_1 \cos(t\sqrt{|D|}) + C_2 \sin(t\sqrt{|D|}) \right) + A,$$

$$P_{\text{6c}}(t) = \frac{e^{-0,5tq}}{\alpha_1} [(\sin(t\sqrt{|D|}))(-C_1\sqrt{|D|} - 0,5C_2q\sqrt{|D|} + C_2(\mu_1 + \alpha_2)) + \cos(t\sqrt{|D|})(C_2\sqrt{|D|} - 0,5C_1q\sqrt{|D|} + C_1(\mu_1 + \alpha_2))] + A(\mu_1 + \alpha_2),$$

$$P_o(t) = 1 - P_{\text{noc}}(t) - P_{\text{6c}}(t),$$

$$A = \frac{\mu_2\alpha_1}{\mu_2\mu_1 + \mu_2\alpha_2 + \mu_2\alpha_1 + \alpha_1\alpha_2},$$

$$C_1 = -A,$$

$$C_2 = \frac{1}{\sqrt{|D|}} \left(\alpha_1 + A(\mu_1 + \alpha_2) - \alpha_1 A(\mu_1 + \alpha_2) - 0,5Aq\sqrt{|D|} \right),$$

$$q = \mu_1 + \alpha_2 + \mu_2 + \alpha_1.$$

Результаты

Полученные зависимости позволяют оценить вероятности состояний безопасности ТО сложной техники. Исходными данными являются значения интенсивностей событий во время ТО: α_1 – интен-

сивность событий «маркер»; α_2 – интенсивность событий совершения ошибочного действия; μ_1 – интенсивность событий корректировки руководителем действий персонала; μ_2 – интенсивность событий последствий ошибочных действий персонала.

При этом стоит учесть, что интенсивности потока событий могут принимать только неотрицательные значения: $\mu_1 \geq 0$, $\mu_2 \geq 0$, $\alpha_1 \geq 0$, $\alpha_2 \geq 0$.

Замечаний руководителя всегда объективно больше, чем неправильно выполненных действий и операций. На практике чаще встречаются работы, в которых руководитель делал замечания, при этом негативных последствий ошибки не допущено. Следовательно, $\mu_1 > \alpha_2$.

Заключение

Таким образом, получена марковская модель безопасности ТО сложной техники, с помощью которой возможно провести анализ безопасности ТО на основании интенсивностей совершенных событий. Модель позволит учесть зависимость безопасности ТО от индивидуальных качеств персонала, участвующего в работах. Дальнейшее развитие модели подразумевает снятие ограничения о стационарности потоков событий процесса ТО и интеграция с моделями действий персонала и контролирующих лиц во время ТО.

Список литературы

1. Александровская Л. Н., Аронов И. З., Елизоров А. И. [и др.]. Статистические методы анализа безопасности сложных технических систем : учебник / под ред. В. П. Соколова. М. : Логос, 2001. 232 с.
2. Акофф Р., Эмери Ф. О целеустремленных системах : пер. с англ. / под ред. И. А. Ушакова. М. : Сов. радио, 1974. 272 с.
3. Вентцель Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология. 2-е изд., стер. М. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. 208 с.

References

1. Aleksandrovskaya L.N., Aronov I.Z., Elizorov A.I. et al. *Statisticheskie metody analiza bezopasnosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem: uchebnik* = *Statistical methods of security analysis of complex technical systems : textbook*. Moscow: Logos, 2001:232. (In Russ.)
2. Akoff R., Emeri F. *O tselestremennykh sistemakh: per. s angl.* = *About purposeful systems : trans. from English*. Moscow: Sov. radio, 1974:272. (In Russ.)
3. Venttsel' E.S. *Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya. 2-e izd., ster.* = *Operations research: tasks, principles, methodology. 2nd ed., ster.* Moscow: Nauka, Gl. red. fiz.-mat. lit., 1988:208. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Максим Андреевич Сивопляс

адъюнкт,
 Филиал Военной академии ракетных войск
 стратегического назначения
 имени Петра Великого (г. Серпухов)
 (Россия, Московская обл.,
 г. Серпухов, ул. Бригадная, 17)
 E-mail: cozaks@bk.ru

Maksim A. Sivoplyas

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

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

Поступила в редакцию/Received 20.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 17.01.2022

Принята к публикации/Accepted 18.02.2022

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

УДК 621.317
doi:10.21685/2307-4205-2022-3-7

К 100-летию со дня рождения
профессора Н. М. Седякина

ОБОБЩЕНИЕ ПОНЯТИЯ РЕСУРСА НАДЕЖНОСТИ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ Н. М. СЕДЯКИНА ДО РЕСУРСА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ЖИВОГО ОРГАНИЗМА

В. А. Смагин¹, Р. О. Лавров², С. Ф. Литвиненко³

^{1,2,3} Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия
¹va_smagin@mail.ru, ²9432923@mail.ru, ³89818438422@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Обоснование требований к эксплуатационным характеристикам современных информационно-измерительных систем неразрывно связано с количественным оцениванием показателей надежности аппаратных и программных средств. При этом весьма востребованной является информация о техническом состоянии на всех стадиях их жизненного цикла. Таким образом целью данной работы является предложение по использованию интегрального показателя надежности технических систем. *Материалы и методы.* В основу представленного исследования положено введенное Седякиным Н. М. понятие ресурса надежности объекта как основного показателя надежности систем, личный опыт авторов, а также изучение опыта других авторов, которые опубликовали соответствующие работы по данной теме. *Результаты.* В статье рассмотрено двухэтапное событие, имевшее место в процессе развития теории надежности систем. *Выводы.* Выполнено исследование ресурса работоспособности объекта и предложены рекомендации по его использованию и дальнейшему развитию в стратегиях реализации исправного технического состояния информационно-измерительных систем с целью повышения их работоспособности.

Ключевые слова: физический принцип теории надежности Седякина Н. М., программное обеспечение, надежность информационно-измерительных систем

Для цитирования: Смагин В. А., Лавров Р. О., Литвиненко С. Ф. Обобщение понятия ресурса надежности технической системы Н. М. Седякина до ресурса работоспособности живого организма // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 54–60. doi:10.21685/2307-4205-2022-3-7

GENERALIZATION OF THE CONCEPT OF THE RELIABILITY RESOURCE OF N.M. SEDYAKIN'S TECHNICAL SYSTEM TO THE OPERABILITY RESOURCE OF A LIVING ORGANISM

V.A. Smagin¹, R.O. Lavrov², S.F. Litvinenko³

^{1,2,3} Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky, Saint Petersburg, Russia
¹va_smagin@mail.ru, ²9432923@mail.ru, ³89818438422@mail.ru

Abstract. *Background.* Substantiation of the requirements for the operational characteristics of modern information-measuring systems is inextricably linked with the quantitative assessment of the reliability indicators of hardware and software. At the same time, information about the technical condition at all stages of their life cycle is in high demand. Thus, the purpose of this work is to propose the use of an integral indicator of the reliability of technical systems. *Materials and methods.* The basis of the presented study is the introduced by Sedyakin N.M. the concept of the reliability resource of an object as the main indicator of the reliability of systems, the personal experience of the authors, as well as the study of the experience of other authors who have published relevant works on this topic. *Results.* The article considers a two-stage event that took place in the process of developing the theory of systems reliability. *Conclusions.* A study of the object's operability resource has been carried out and recommendations have been proposed for its use and further development in strategies for implementing the correct technical condition of information-measuring systems in order to ensure their operability.

Keywords: physical principle of reliability theory Sedyakin NM, software, reliability of information-measuring systems

For citation: Smagin V.A., Lavrov R.O., Litvinenko S.F. Generalization of the concept of the reliability resource of N.M. Sedyakin's technical system to the operability resource of a living organism. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(3):54–60. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-3-7

Введение

19 апреля 2022 г. исполнилось 100 лет со дня рождения выдающегося ученого, доктора технических наук, профессора Николая Михайловича Седякина, начальника кафедры эксплуатации автоматизированных систем управления и связи Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского, известного ученого в теории случайных импульсных потоков, теории эксплуатации сложных систем и теории надежности. В 1965 г. им сделан доклад на тему «Об одном физическом принципе теории надежности и его приложениях», а в 1966 г. опубликована статья в журнале «Известия АН СССР. Техническая кибернетика» [1]. Сущность его работы сводится к тому, что им впервые сформулирован основной закон теории надежности, который гласит, что надежность системы зависит от величины выработанного ею ресурса надежности и не зависит от того, как он был выработан. Ресурс надежности количественно определялся в виде

$$r(t, \varepsilon) = \int_0^t \lambda(z, \varepsilon) dz, \quad (1)$$

где $\lambda(t, \varepsilon)$ – интенсивность отказа системы, работающей в течение времени t в условиях физического нагружения ε .

Закон многократно проверялся экспериментально на различных технических элементах и устройствах, и было установлено, что он выполнялся при недостаточно сильных физических нагружениях. Но при сильных нагружениях его выполнение не наблюдалось. Тем не менее на основе этого закона было написано большое количество научных работ по теории надежности, и он использовался при ускоренных и форсированных испытаниях элементов и систем на надежность.

Одним из авторов статьи выполнен ряд научных исследований и опубликовано предложение с теоретическим обобщением закона [2]. Сущность этого предложения заключалась в необходимости учета при расчетах надежности перепадов величин нагружений и времени их наблюдения.

Если ранее вероятность безотказной работы объекта определялась по формуле

$$P(t, \varepsilon) = e^{-\int_0^t \lambda(z, \varepsilon) dz}, \quad (2)$$

то после теоретического обобщения было рекомендовано вводить относительное условное нагружение и выполнять расчеты надежности с применением не только интегральной формы расчета (2), но и с переходом к интегрально дифференциальной форме расчета.

Надежность программного обеспечения и формула D. Musa. Если 60-е гг. прошлого столетия были годами появления и становления теории надежности аппаратных средств, то 80-е гг. были годами рождения и развития надежности программных средств. Конечно, доработки на технике были связаны с повышением надежности и готовности на первом этапе развития этой науки. Но они не были столь характерными как на втором этапе развития, а именно периоде развития программной надежности. Поэтому первый характеризуется появлением понятия ресурса надежности и формулы

Н. М. Седякина для него, второй этап характеризуется появлением модели доработок в программном обеспечении в виде тестирования и формулы D. Musa для него [4].

В своей работе D. Musa показал, какого эффекта в надежности программы можно достичь, если до ее применения по назначению многократно подвергать тестированию с целью обнаружения и устранения дефектов в ней. Он предложил простейшую математическую модель расчета безошибочности программы с учетом ее предварительного тестирования до использования ее по назначению [4]. Если воспользоваться понятием ресурса надежности Н. М. Седякина, то в обобщенном виде можно записать выражение для вероятности ее безошибочного функционирования:

$$P(r, \rho) = e^{-r} \cdot e^{-\rho}, \tag{3}$$

где r – обычный ресурс надежности программы после ее изготовления, а ρ – ресурс, потраченный на ее предварительное тестирование. Используя временные обозначения для времени использования программы по назначению t и времени ее тестирования τ , можно записать

$$P(t, \tau) = e^{-\int_0^t \lambda(z) dz} \cdot e^{-\int_0^\tau v(z) dz}, \tag{4}$$

где λ – интенсивность возникновения ошибки в программе, а v – интенсивность обнаружения и устранения дефекта в программе при ее тестировании до применения.

Если ранее вероятность безошибочной работы программы мы обозначали как $P(t)$ и называли ее безотказностью, то в условиях получения формулы (4) будем вероятность $P(t, \tau)$ называть вероятностью работоспособности программы. С ней свяжем понятие ресурса $r(t, \tau)$ работоспособности программы, который в отличие от ресурса надежности будем понимать так:

$$r(t, \tau) = \int_0^t \lambda(z) dz + \int_0^\tau v(z) dz. \tag{5}$$

В приведенных выражениях временные показатели надежности (работоспособности) следует сопровождать показателями условий их получения или, точнее, физического нагружения, как это, например, делается в формуле ресурса надежности введением величины нагружения ϵ . Мы этого не делаем в силу того, чтобы не усложнять математические выражения.

Исследование влияния процесса тестирования программы на ее работоспособность. Программа расчета надежности нами рассматривается как один из возможных объектов расчета надежности в технике. Рассмотрим упражнение в виде выполнения численных расчетов простого примера с применением обобщенной формулы D. Musa с целью ее графического представления. Итак, мы имеем выражение для определения вероятности безошибочного функционирования программы:

$$P(r, \rho) = e^{-r} \cdot e^{-\rho}, \tag{6}$$

в которой r – ресурс надежности программы в смысле Н. М. Седякина, а ρ – дополнительный потенциальный ресурс работоспособности, вводимый в разработанную программу в процессе ее предварительных доработок или тестирования. Формальное количественное представление ρ выражается так же, как и ресурс r , но имеет совершенно другое смысловое содержание.

В выполняемом примере полагаем, что значения r изменяются непрерывно в некотором диапазоне значений, а значения ρ принимают значения $\rho = 0, \rho_1 = 1, \rho_2 = 5$. При этих значениях ρ вероятности успешной работоспособности, соответственно, принимают следующие выражения:

$$P_0(r, \rho) = e^{-r} \cdot e^{-\rho}, P_1(r, \rho_1) = e^{-r} \cdot e^{-\rho_1}, P_2(r, \rho_2) = e^{-r} \cdot e^{-\rho_2}. \tag{7}$$

На рис. 1 представлены вероятности (7). Из данного рисунка следует, что вероятность сохранения успешной работоспособности программы в зависимости от величины предварительно введенного потенциального ресурса ρ до начала ее применения возрастает с его увеличением.

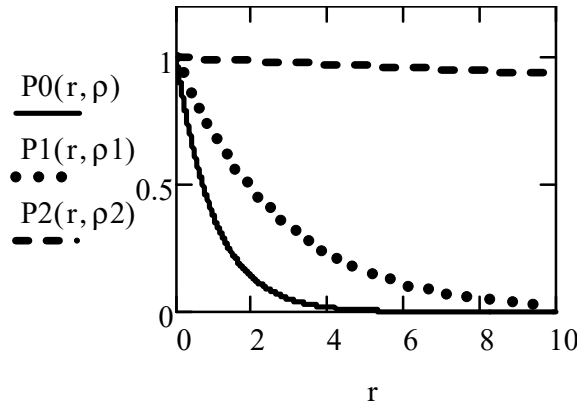


Рис. 1. Характер изменения вероятностей $P(0)$, $P(1)$, $P(2)$

Далее рассмотрим зависимость полного ресурса работоспособности программы от ее ресурса надежности $H. M. \text{Седякина}$ при различных значениях введенного потенциального ресурса. Полный ресурс работоспособности программы представляется следующими выражениями:

$$R(r, \rho) = r \cdot e^{-\rho}, \quad R(t, \tau) = \left(\int_0^t \lambda(z) dz \right) \cdot e^{-\int_0^{\tau} \mu(u) du} \quad (8)$$

Рассмотрим три значения величины полного ресурса работоспособности программы при указанных выше значениях потенциального ресурса $\rho = 0, \rho_1 = 1, \rho_2 = 5$ по первой формуле из (7). Они представляются такими выражениями:

$$R0(r) = r \cdot e^{-\rho}, \quad R1(r) = r \cdot e^{-\rho_1}, \quad R2(r) = r \cdot e^{-\rho_2} \quad (9)$$

На рис. 2 представлены графики зависимостей выражения (8). Они позволяют сделать вывод о том, что в зависимости от значения величины ресурса надежности $H. M. \text{Седякина}$ программы значения полного ресурса ее работоспособности увеличиваются. Это определяется тем, что величина выработанного программой ресурса увеличивается. При этом величина выработанного полного ресурса работоспособности программы наблюдается тем меньше, чем большее значение у нее предварительно введенного потенциального ресурса. Иначе можно утверждать, что чем больше величина предварительно введенного в нее потенциального ресурса до применения программы по назначению, тем больше у программы способность сохранять меньшую величину вырабатываемого ею ресурса при эксплуатации. Для простоты восприятия эффекта рассмотрим простой расчетный пример. Пусть величина ресурса надежности изготовленной программы (ресурса $H. M. \text{Седякина}$) без ее профилактического обслуживания (тестирования) равна $r = 0,5$. Рассмотрим, какой результат мы получим, если будем вводить в нее потенциальный ресурс величиной ρ . На рис. 3 показана зависимость вероятности успешной реализации программы в данном случае, которая вычислена по формуле

$$P(r, \rho) = e^{-r} \cdot e^{-\rho}, \quad r = 0,5, \rho = 0, 0,1 \dots 10 \quad (10)$$

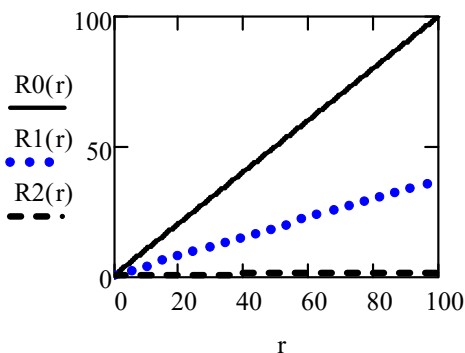


Рис. 2. Изменение полного ресурса работоспособности программы

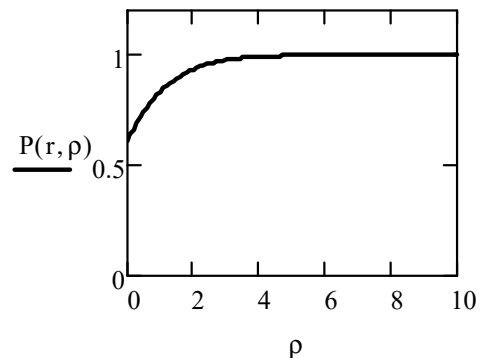


Рис. 3. Зависимость вероятности успешной реализации программы

Обобщение понятия ресурса надежности Н. М. Седякина на основе вероятностной модели D. Musa до понятия ресурса работоспособности живого организма и его значение

Подведем условный вывод о кратком поэтапном развитии теории надежности, представленном в виде дух последовательных этапов, соответствующих появлению двух количественных характеристик, или показателей Н. М. Седякина и D. Musa. Надежность – это свойство объекта сохранять его работоспособность в определенных условиях в течение определенного времени [1]. Имевшееся ранее различие к подходу теории надежности в формах математического и физического считаем несущественным, так как они преследовали одну и ту же цель и только дополняли и обогащали друг друга.

На первом этапе развития теории надежности профессор Н. М. Седякин предложил обобщенный интегральный показатель надежности технических объектов, названный им ресурсом надежности на основе существования реальных физических и вероятностных (статистических) данных.

На втором этапе развития теории надежности, связанном с такими процессами, как доработка объектов по выявлению и устранению дефектов техники до ее применения по назначению, а также тестирование сложных программных средств, зарубежный ученый D. Musa предложил новую математическую модель, включающую количественный учет дополнительного экспериментального исследования объектов с целью повышения их работоспособности в процессе применения по назначению.

Рассмотрение двух совместных этапов количественного оценивания надежности технических и программных объектов позволило нам ввести обобщенный показатель работоспособности в виде формулы (5). С нашей точки зрения этот показатель может быть применен не только для технических и программных средств техники, но и информационных средств, какими являются и живые организмы, а именно: человек и человеко-машинные комплексы. Действительно, природа создает человека, наделяет его в определенных условиях жизненного существования конечным статистическим (вероятностным) ресурсом. Это право дано природе в виде первого этапа для успешного существования. Его можно определить количественно в смысле ресурса надежности Н. М. Седякина. Вступая в жизнь с этим ресурсом, человек вступает в реализацию второго этапа жизни. Его работоспособность при данном ресурсе первого этапа на втором этапе будет существенно зависеть от личного поведения. Этим поведением он может управлять, выбирая и создавая свой комплекс условий существования. Человек сам может создавать себе программу существования, выбирать по своему усмотрению те жизненные факторы, которые помогут ему способствовать достижению цели. Это во многом определяется теми условиями жизни, в которые он попадает.

Как можно трактовать рассматриваемый обобщенный показатель работоспособности живого организма, человека? Система природы с ее условиями порождает человека с определенным ресурсом надежности его деятельности и жизни. Этот ресурс количественно статистически конечен из-за воздействия внешних и внутренних факторов. Выбирая жизненную стратегию перехода ко второму этапу жизни, он может управлять величиной потенциально вводимого ресурса работоспособности, вводя «доработки» и «процесс тестирования и устранения» этим некоторых определенных нежелательных событий жизни. В формуле (5) введен в показателе степени γ у ресурса надежности Н. М. Седякина сомножитель $e^{-\rho}$, означающий уменьшение утраченного ресурса надежности Н. М. Седякина тем больше, чем больше величина введенного предварительно потенциального ресурса. Физически это означает прореживание существующих вредоносных событий по мере введения значения и величины потенциального ресурса. Величина этого потенциального ресурса уже не может содержать дополнительного экспоненциального сомножителя, который мог бы только ухудшить реальную ситуацию с наступлением новых во времени жизни человека событий. Величина этого потенциального ресурса может быть представлена только суммой частных составляющих потенциального ресурса, вводимых человеком в процессе его жизни. Формально, это представимо так:

$\rho = \sum_{i=1}^{\hat{n}} \rho_i$, где \hat{n} – случайное число событий, а ρ_i – величина частного жизненного ресурса. Если бы

мы ввели величину для сомножителя показателя ресурса ρ в виде $e^{+\gamma}$, то пришли бы к нереальному выводу о единичной вероятности существования живого организма. Если ρ представить в виде суммы частных ресурсов, то это может позволить решать новые реальные для жизни человека задачи обеспечения его работоспособности с учетом различных затрат и факторов жизни. Но это представляется нам как задача будущего исследования.

Заключение

В статье выделено двухэтапное событие, имевшее место в процессе развития теории надежности систем. Первый этап связан с введением Н. М. Седякиным понятия ресурса надежности объекта как основного показателя надежности систем, который объект имеет и вырабатывает во время применения по назначению.

Второй этап связан с явлением увеличения продолжительности действия объекта за счет устранения его возможных отказов и дефектов благодаря доработкам технического объекта и тестирования функционирования программного обеспечения объекта перед применением по назначению.

На основе выделения этих двух этапов предложено количественное обобщение их частных показателей в один общий показатель – ресурс работоспособности объекта. Выполнено исследование свойств этого показателя и предложены рекомендации по его использованию и дальнейшему развитию в стратегиях жизненной деятельности человека с целью повышения его работоспособности.

Предложенная модель оценивания и обеспечения работоспособности может быть использована при разработке государственной комплексной математической модели противодействия пандемии, которая в настоящее время находится на стадии создания.

Список литературы

1. Седякин Н. М. Об одном физическом принципе теории надежности // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1966. № 3. С. 80–87.
2. Смагин В. А. Обобщение физического принципа теории надежности профессора Н. М. Седякина // Информатика и космос. 2006. № 3. С. 71–78.
3. Смагин В. А. Модели оценивания надежности элементов на основе форсирования испытаний // Техническая синергетика. Вероятностные модели сложных систем : Монография. СПб., 2004. 171 с.
4. Musa J. A theory of software reliability and its application // IEEE Trans. on software Eng. 1975. Vol. SE-1. P. 312–327.

References

1. Sedyakin N.M. On one physical principle of reliability theory. *Izvestiya AN SSSR. Tekhnicheskaya kibernetika = Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Technical cybernetics*. 1966;(3):80–87. (In Russ.)
2. Smagin V.A. Generalization of the physical principle of the reliability theory of Professor N.M. Sidyakin. *Informatsiya i kosmos = Information and Cosmos*. 2006;(3):71–78. (In Russ.)
3. Smagin V.A. Models for assessing the reliability of elements based on forcing tests. *Tekhnicheskaya sinergetika. Veroyatnostnye modeli slozhnykh sistem : monografiya = Technical Synergetics. Probabilistic models of complex systems : monograph*. St. Petersburg, 2004:171. (In Russ.)
4. Musa J.A theory of software reliability and its application. *IEEE Trans. on software Eng*. 1975;SE-1:312–327.

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Александрович Смагин

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры метрологического обеспечения
вооружения, военной и специальной техники,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: va_smagin@mail.ru

Роман Олегович Лавров

кандидат технических наук, доцент,
заместитель начальника кафедры
метрологического обеспечения вооружения,
военной и специальной техники,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: 9432923@mail.ru

Vladimir A. Smagin

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department of metrological support
of weapons, military and special equipment,
Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg, Russia)

Roman O. Lavrov

Candidate of technical sciences, associate professor,
deputy head of the sub-department of metrological
support of weapons, military and special equipment,
Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg, Russia)

Сергей Федорович Литвиненко

кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры метрологического обеспечения
вооружения, военной и специальной техники,
Военно-космическая академия
имени А. Ф. Можайского
(Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13)
E-mail: 89818438422@mail.ru

Sergey F. Litvinenko

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of metrological support of weapons,
military and special equipment,
Military Space Academy named after A.F. Mozhaysky
(13 Zhdanovskaya street, Saint Petersburg, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 22.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 19.01.2022

Принята к публикации/Accepted 21.02.2022

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА НАЗЕМНОЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ БОРТОВОЙ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

В. А. Комаров¹, А. В. Сарафанов²

^{1,2} Сибирский федеральный университет, Красноярск, Россия

¹ Информационные спутниковые системы имени академика М. Ф. Решетнева, Железногорск, Россия

² Витте Консалтинг (ГК «АЙ-ТЕКО»), Москва, Россия

¹ vkomarov@iss-reshetnev.ru, ² sarafanov@i-teco.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Внедрение новых средств технологического оснащения процессов экспериментальных исследований бортовой радиоэлектронной аппаратуры систем управления космических аппаратов на этапах ее производства и поддержки эксплуатации обуславливает необходимость обновления соответствующего методического обеспечения с учетом сформированных направлений развития цифровизации в ракетно-космической отрасли. *Материалы и методы.* Новое техническое решение аппаратно-программного эмулятора интерфейсных модулей сопряжения реализовано на основе использования аппаратно-программных ресурсов в режиме временного разделения. Внедрение эмулятора в производственную деятельность повышает степень автоматизации производственных процессов предприятия, а новые методики его прикладного применения реализуют механизмы информационной поддержки процессов жизненного цикла бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов. *Результаты.* Разработан аппаратно-программный комплекс, обеспечивающий эмуляцию работы восьми интерфейсных модулей сопряжения для вычислительного модуля аппаратуры в режиме жесткого реального времени на основе одного комплекта оборудования. Функциональные возможности эмулятора обеспечили повышение информативности проводимых исследований аппаратуры за счет возможности реализации расширенных методик испытаний (имитация отказов блоков аппаратуры, отладка режима автономного сохранения ориентации космического аппарата, работа с резервными комплектами и др.). Предложены методики применения эмулятора в качестве средств технологического оснащения прикладных экспериментальных исследований бортовой радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов на этапах ее проектирования и эксплуатации. *Выводы.* Внедрение в организационно-техническую систему предприятия аппаратно-программного эмулятора интерфейсных модулей сопряжения в комплексе с новым методическим обеспечением процессов прикладных экспериментальных исследований позволило: реализовать механизмы интеграции и управления служебными данными об изделии в рамках единого информационного пространства предприятия; повысить на этапах проектирования и эксплуатации качество наземной экспериментальной отработки аппаратуры; сократить материальные затраты на необходимое технологическое оснащение испытаний; снизить влияние человеческого фактора на воспроизводимость результатов испытаний; а также повысить отказоустойчивость космических аппаратов в целом на этапе их эксплуатации.

Ключевые слова: бортовая радиоэлектронная аппаратура, космический аппарат, испытания, автоматизация, временное разделение, программное обеспечение, цифровой двойник, информационная поддержка, электронное предприятие

Для цитирования: Комаров В. А., Сарафанов А. В. Повышение качества наземной экспериментальной отработки бортовой радиоэлектронной аппаратуры систем управления космических аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 61–69. doi:10.21685/2307-4205-2022-3-8

INCREASING THE QUALITY OF GROUND EXPERIMENTAL RESEARCH OF ONBOARD ELECTRONIC EQUIPMENT FOR SATELLITE CONTROL SYSTEMS

V.A. Komarov¹, A.V. Sarafanov²

^{1,2} Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

¹ Information Satellite Systems named after Academician M.F. Reshetnev, Zheleznogorsk, Russia

² Witte Consulting (GC "AI-TECHO"), Moscow, Russia

¹ vkomarov@iss-reshetnev.ru, ² sarafanov@i-teco.ru

Abstract. *Background.* The introduction of new means of technological equipment for the processes of experimental research of on-board radio-electronic equipment of satellite control systems at the stages of its production and operation support necessitates updating the corresponding methodological support, taking into account the formed directions of digitalization in the rocket and space industry. *Materials and methods.* A new technical solution for the hardware-software emulator of interface modules is implemented on the use of hardware-software resources in the time-sharing mode. The introduction of the emulator into production activities increases the degree of automation of the production processes of the enterprise, and new methods of its application implement the mechanisms for information support of the life cycle processes of the onboard radio-electronic equipment of satellite. *Results.* A hardware-software complex has been developed, its provide emulation of the operation of eight interface modules for the computing module of the onboard equipment in hard real-time mode based on one set of technological equipment. The functionality of the emulator provided an increase in the information content of the ongoing research of the equipment due to the possibility of implementing extended test methods (imitation of failures of equipment units, debugging the mode of autonomous preservation of the attitude of the satellite, working with backup sets, etc.). Methods for using the emulator as a means of technological equipment for applied experimental research on the onboard radio-electronic equipment of satellite at the stages of its design and operation are proposed. *Conclusions.* The implementation of a hardware-software emulator of interface modules into the organizational and technical system of the enterprise in combination with new methodological support for the processes of applied experimental research made it possible to: implement the mechanisms for integrating and managing service data about the product within the framework of a single information space of the enterprise; to improve the quality of ground experimental testing of equipment at the stages of design and operation; reduce material costs for the necessary technological equipment for testing; reduce the influence of the human factor on the reproducibility of test results; as well as to improve the fault tolerance of spacecraft as a whole at the stage of their operation.

Keywords: onboard electronic equipment, satellite, testing, automation, time-sharing, software, digital twin, information support, electronic enterprise

For citation: Komarov V.A., Sarafanov A.V. Increasing the quality of ground experimental research of onboard electronic equipment for satellite control systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(3):61–69. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-3-8

Введение

Внедрение вычислительных устройств в бортовую радиоэлектронной аппаратуру (БРЭА) систем управления перспективных космических аппаратов (КА) с длительным сроком активного существования (до 15 лет и более) в комплексе с повышенными требованиями к безотказности ее функционирования обуславливают необходимость создания специализированных автоматизированных систем прикладных экспериментальных исследований как на этапах проектирования, так и на этапах последующей эксплуатации [1–8]. Одним из решений, направленным на повышение полноты и рациональности использования трудовых и материальных ресурсов предприятия на основе новейших достижений научно-технического прогресса, является разработанный, внедренный и успешно эксплуатируемый в АО «ИСС» аппаратно-программный эмулятор интерфейсных модулей сопряжения (ИМС) с временным разделением аппаратно-программных ресурсов [2, 9]. Данный эмулятор входит в состав наземного комплекса автономной отработки (испытаний) специального программного обеспечения (СПО) унифицированного вычислительного модуля (ВМ) БРЭА систем управления КА (блок управления, блок интерфейсный) [1, 2, 9–12]. Как известно, внедрение новых технологий и средств технологического оснащения в рамках процессов интенсификации производства обуславливает необходимость совершенствования методического обеспечения соответствующих технологических процессов, в том числе и процессов экспериментальных исследований БРЭА КА на различных этапах ее жизненного цикла. Таким образом, разработка методик применения эмулятора интерфейсных модулей сопряжения в качестве нового технологического оборудования и его интеграция в организационно-техническую систему предприятия является актуальной задачей [13, 14].

Материалы и методы

Управление технологическим процессом автономного тестирования СПО ВМ БРЭА КА осуществляется посредством взаимодействия оператора с графическим интерфейсом управляющей ЭВМ наземного комплекса автономной отработки [11, 12]. На основе графического интерфейса выполняются:

- загрузка тестируемой версии СПО ВМ через технологический канал;
- конфигурирование эмулятора ИМС (настройка адресов, алгоритмов преобразования команд управления и пр.);

– формирование и выдача внешних команд управления, а также сбор и отображение телеметрической информации о функционировании ВМ и ИМС.

Обобщенная структурная схема наземного комплекса приведена на рис 1.

*Конструктивно-технологическая реализация
эмулятора на базе промышленной платформы
PXI*

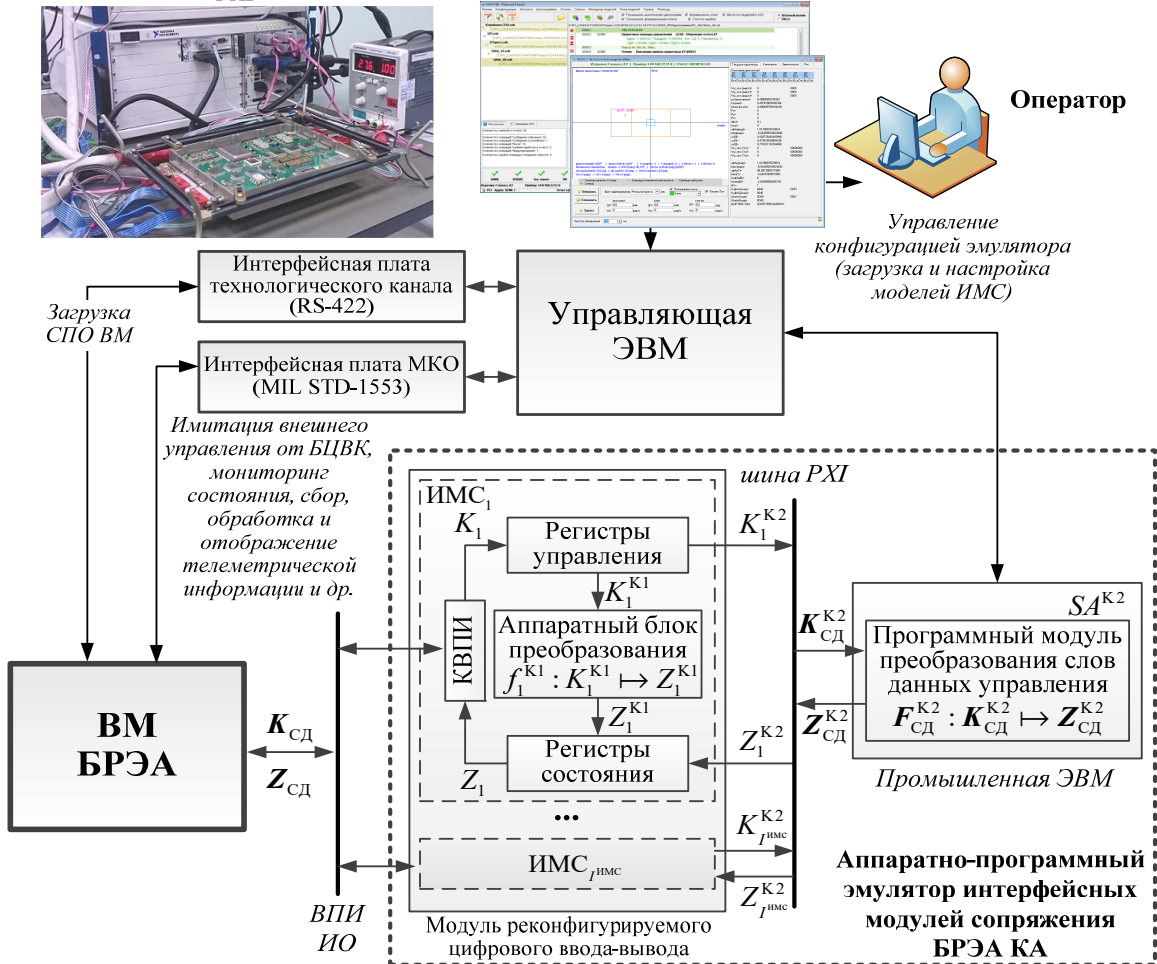


Рис. 1. Обобщенная структурная схема наземного комплекса автономной отработки специального программного обеспечения вычислительного модуля БРЭА с применением технического решения эмулятора интерфейсных модулей сопряжения: ВМ – вычислительный модуль; ИМС – интерфейсный модуль сопряжения; БЦВК – бортовой центральный вычислительный комплекс;

СПО – специальное программное обеспечение; ВПИ ИО – внутриприборный интерфейс информационного обмена; КВПИ – контроллер внутриприборного интерфейса

В процессе функционирования ВМ БРЭА формирует и передает по внутриприборному интерфейсу на соответствующие ИМС слова данных управления: $K_{сд} = \{K_i | i = 1, I_{ИМС}\}$, где $I_{ИМС}$ – число ИМС, входящих в состав БРЭА. С точки зрения информационного обмена, подмножества K_i преобразуются в ИМС в подмножества слов данных состояния Z_i . Функция отношения $f_i : K_i \mapsto Z_i$ определяется схмотехнической реализацией и логикой работы соответствующего ИМС [8–10]. Разработанный аппаратно-программный эмулятор ИМС реализует в режиме «жесткого» реального времени совокупность функциональных преобразований $F_{сд} : K_{сд} \mapsto Z_{сд}$, где $Z_{сд} = \{Z_i | i = 1, I_{ИМС}\}$, $F_{сд} = \{f_i | i = 1, I_{ИМС}\}$.

В качестве технических средств реализации преобразований $F_{сд}$ используются ПЛИС унифицированного модуля реконфигурируемого цифрового ввода-вывода PXI-7813R ($F_{сд}^{K1} : K_{сд}^{K1} \mapsto Z_{сд}^{K1}$) и ресурсы центрального процессора промышленной ЭВМ ($F_{сд}^{K2} : K_{сд}^{K2} \mapsto Z_{сд}^{K2}$) (см. рис. 1) в режиме

временного разделения. На основе ПЛИС разработаны и созданы 12 типов базовых функциональных моделей ИМС для блока управления и блока интерфейсного, входящих в состав бортового комплекса управления КА различного функционального назначения (связи и телевещания, ретрансляции, навигации и др.).

Организацию процессов производства и эксплуатации бортовой радиоэлектронной аппаратуры в течение всего срока активного существования КА (до 15 лет и более) предлагается реализовать посредством сквозного использования информационных технологий в рамках процессов управления данными о создаваемой и эксплуатируемой БРЭА (анализ, накопление, хранение, актуализация и пр.), порождаемых в цифровой форме.

Методическое обеспечение технологических процессов автономной отработки программного обеспечения вычислительного модуля БРЭА КА

Разработанная методика проведения автономного тестирования СПО ВМ на этапе проектирования БРЭА с использованием разработанного эмулятора представлена на рис. 2 блок-схемой ее алгоритма.

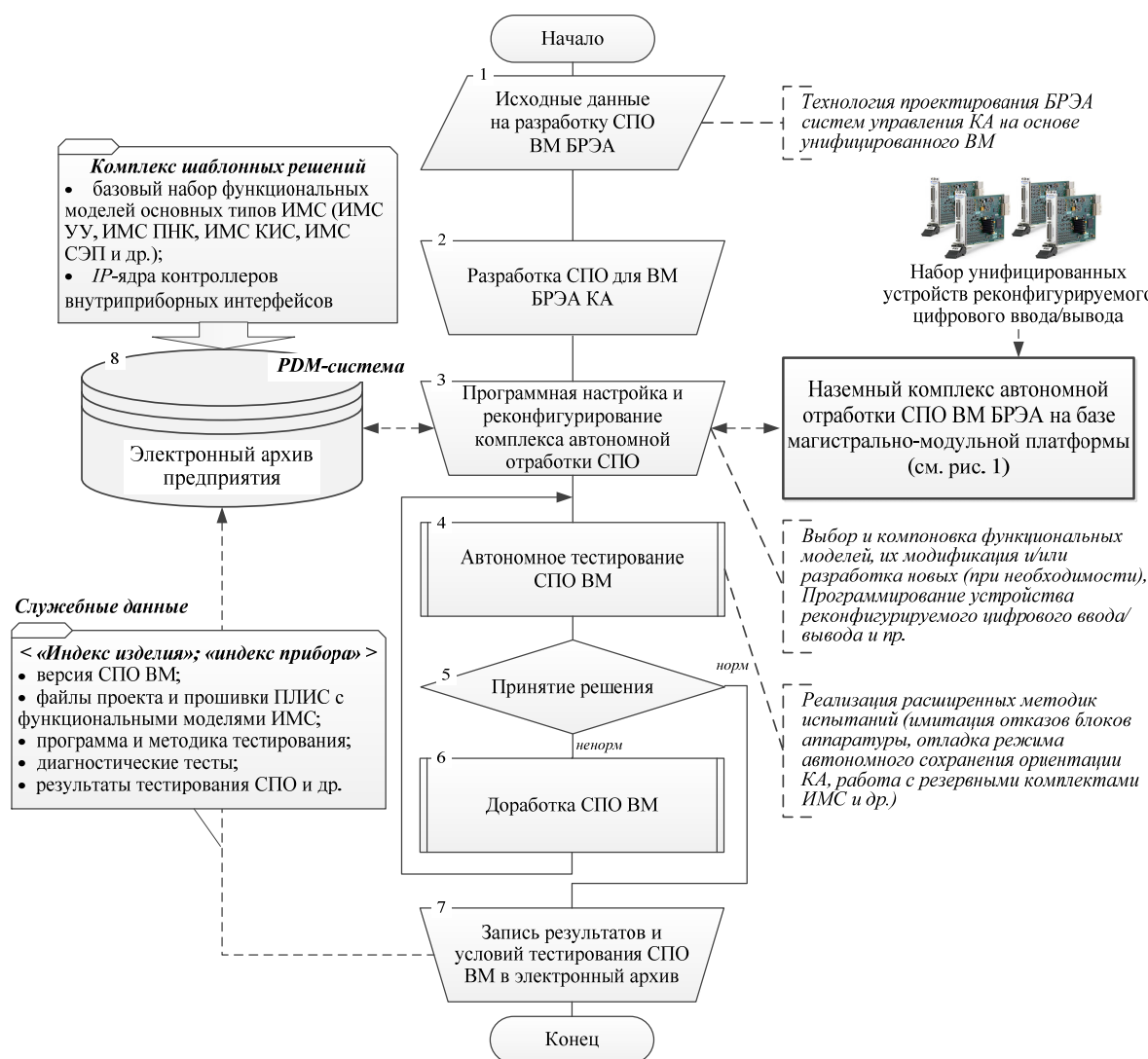


Рис. 2. Блок-схема алгоритма методики применения эмулятора в процессе проектирования БРЭА систем управления КА: PDM – Product Data Management; ВМ – вычислительный модуль; СПО – специальное программное обеспечение; ИМС – интерфейсный модуль сопряжения; УУ – устройства управления; ПНК – преобразователь напряжения в код; КИС – контрольно-измерительная система; СЭП – система электропитания

На основе анализа технического задания на проектируемую аппаратуру (блок управления, блок интерфейсный) формируются исходные данные на разработку СПО ВМ (блок 1). Разработанное СПО

загружается в технологический ВМ наземного комплекса (см. рис. 1) для проведения последующей автономной отработки (блоки 2–3). К ключевым задачам автономной отработки СПО ВМ (блоки 4–6), решаемым на этапе проектирования БРЭА систем управления КА относятся:

- поиск и устранение ошибок в СПО;
- проверка СПО при функционировании ВМ в нештатных ситуациях (переключение на основной/резервный комплект ИМС, частичная или полная неисправность ИМС, отказ системы, узла и/или агрегата КА);
- проверка полноты покрытия тестов посредством искусственного внесения ошибки в СПО и др.

Вариативность исполнения БРЭА для разных КА (различие по числу, составу, внутренней структуре и параметрам ИМС) обуславливают необходимость наличия механизма взаимодействия наземного комплекса с электронным архивом предприятия (блоки 7–8) в целях формирования базы вновь создаваемых функциональных моделей ИМС, а также реализации возможности проведения экспериментальных исследований на основе цифрового двойника функционального поведения соответствующей аппаратуры в течение периода ее эксплуатации на борту КА (до 15 лет и более). Как правило, такая необходимость возникает при отказах каких-либо узлов и/или агрегатов КА и др.

Соответствующие файлы и параметры конфигурации эмулятора ИМС с точки зрения процессов управления данными об изделии относятся к служебным данным, необходимым для выполнения работ по разработке, изготовлению и эксплуатации изделия¹. Дальнейшие изменения, внесенные в конструкторскую документацию на ИМС, в процессе изготовления БРЭА отображаются в соответствующих моделях посредством их программной модификации [9].

Методика применения разработанного эмулятора ИМС на этапе сопровождения эксплуатации БРЭА приведена на рис. 3 в виде блок-схемы ее алгоритма.

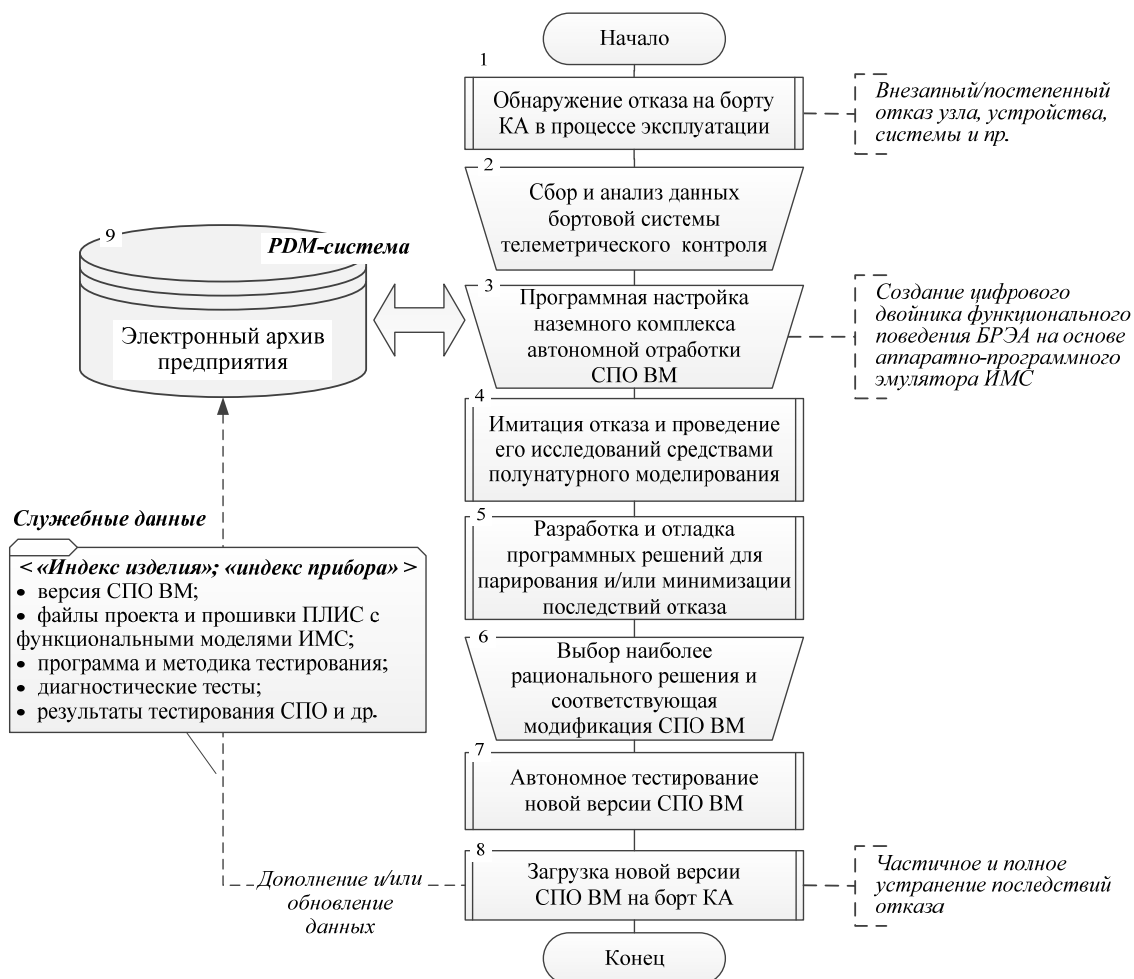


Рис. 3. Блок-схема алгоритма методики применения эмулятора ИМС в процессе эксплуатации БРЭА систем управления КА

¹ ГОСТ Р 58675–2019. Автоматизированная система управления данными об изделии. Общие требования.

Возникновение нештатной ситуации на борту КА (внезапный или постепенный отказ блока БРЭА, функционального узла, системы) нередко приводит к полной или частичной потере его функций (сокращение срока активного существования, снижение объема решаемых целевых задач и др.). В свою очередь, возможность создания в наземных условиях цифрового двойника функционального поведения БРЭА систем управления позволяет в ряде случаев также выполнить парирование возникшей неисправности КА посредством соответствующей модификации СПО ВМ.

В рамках данного подхода на основе результатов анализа данных телеметрии, полученных с КА, выполняется локализация возникшего отказа (блоки 1–2). Соответствующие файлы и параметры конфигурации эмулятора ИМС (служебные данные), размещенные ранее в электронном архиве предприятия (см. рис. 2, блок 7), используются при создании цифрового двойника функционального поведения БРЭА для соответствующего КА с использованием оборудования наземного комплекса (см. рис. 1). Посредством управления функциональными преобразованиями $F_{сд} : K_{сд} \mapsto Z_{сд}$ обеспечивается имитация новых условий функционирования БРЭА в составе КА (блок 3) [9, 11, 12].

Создаваемый цифровой двойник функционального поведения БРЭА применяется для прототипирования решений по устранению и/или минимизации последствий отказа, их тестированию и отладке (блоки 4–7). Модифицированная версия СПО ВМ загружается на борт КА, а соответствующие служебные данные дополняются и/или обновляются в электронном архиве предприятия (блоки 8–9). В дальнейшем, при возникновении отказа БРЭА, шаги методики повторяются.

Таким образом на основе представленных методик реализуются интеракционное накопление и поддержание в актуальном состоянии соответствующих данных о БРЭА, эксплуатируемой на борту КА, с возможностью централизованного и оперативного доступа оператора к ним при необходимости.

Результаты

Сравнительный анализ исходного и модифицированного производственных процессов создания БРЭА КА представлен в виде лепестковой диаграммы на рис. 4.

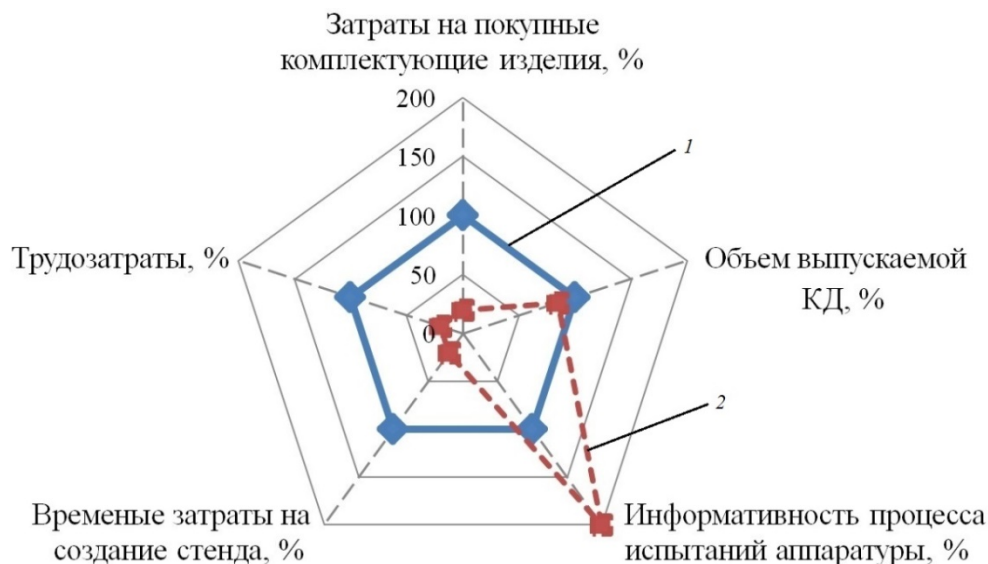


Рис. 4. Сравнительная диаграмма параметров процессов создания бортовой радиоэлектронной аппаратуры бортового комплекса управления КА: 1 – исходный; 2 – модифицированный

Внедрение разработанного эмулятора обеспечило [9]:

- расширение в 2–3 раза перечня обрабатываемых режимов работы БРЭА систем управления КА;
- сокращение в 3 и более раз номенклатуры и объема применяемых технических средств за счет унификации и возможности программного реконфигурирования и многократного использования одного комплекта технологического оборудования (эмулятора ИМС) в процессе проектирования и эксплуатации БРЭА;

- снижение в несколько раз временных и материальных затрат на создание наземного комплекса автономной обработки СПО ВМ посредством исключения необходимости изготовления технологических комплектов ИМС;
- сокращение на 10–15 % объема КД, разрабатываемой и выпускаемой тематическим подразделением;
- уменьшение в несколько раз количества штатных единиц, задействованных при создании и эксплуатации наземного комплекса автономной обработки СПО¹.

Заключение

Внедрение технического решения аппаратно-программного эмулятора интерфейсных модулей сопряжения позволило модернизировать производственные процессы создания и эксплуатации БРЭА систем управления КА по ряду параметров (расширить в 2–3 раза функциональные возможности испытаний, унифицировать технологическую оснастку и др.). В частности, заложенный в основу эмулятора принцип временного разделения аппаратно-программных ресурсов обеспечил снижение в несколько раз затрат на создание соответствующего автоматизированного комплекса наземной обработки. Разработанное новое методическое обеспечение по применению эмулятора в ходе экспериментальных исследований на различных этапах жизненного БРЭА КА включает в себя операции, выполняемые оператором в рамках процедур интеграции в единое информационное пространство предприятия и обеспечивающие реализацию механизмов управления данными об изделии. Это в свою очередь позволяет повысить производительность труда, качество и конкурентоспособность создаваемой продукции за счет сокращения объема и трудоемкости ручных операций, снижения влияния человеческого фактора на воспроизводимость результатов испытаний.

В целом предложенные методики также являются составными частями комплекса мероприятий, реализуемых в рамках программ «Цифровизация проектного и конструкторского направления» и «Цифровая система управления данными» Стратегии цифровой трансформации Акционерного общества «Информационные спутниковые системы» имени академика М. Ф. Решетнева на период до 2025 г. и перспективу до 2030 г.

Список литературы

1. Пичкалев А. В. Наземный отладочный комплекс бортовой радиоэлектронной аппаратуры // Решетневские чтения : материалы XIV Междунар. науч. конф. Красноярск : Сиб. гос. аэрокосм. ун-т, 2010. Т. 2, С. 515–516.
2. Комаров В. А., Пичкалев А. В. Применение технологий NI FPGA при испытаниях бортовой аппаратуры космических аппаратов // Интеллект и наука : тр. XI Междунар. науч.-практ. конф. (г. Железногорск, 28–29 апреля 2011 г.). Красноярск : Центр информации, 2011. С. 146–148.
3. Тюгашев А. А. Подход к обеспечению отказоустойчивости космических аппаратов на основе автоматизации проектирования интеллектуальных бортовых программных средств // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 2. С. 9–16.
4. Бубнов О. В., Кремзуков Ю. А., Пчельников В. А. [и др.]. Автоматизированное рабочее место обработки и испытаний энергопреобразующей аппаратуры системы электропитания космического аппарата // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2017. Т. 20, № 3. С. 35–39. doi:10.21293/1818-0442-2017-20-3-35-39
5. Ломаев Ю. С., Иванов И. А., Толстых А. В., Ислентьев Е. В. Применение программно-математических моделей бортовой аппаратуры при разработке бортового программного обеспечения // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20, № 2. С. 166–173. doi:10.31772/2587-6066-2019-20-2-166-173
6. Li J., Xiao M., Kang W., Lv Y. Research on reconfigurable instrument technology of portable test system of missiles // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 452, № 12. doi:10.1088/1757-899x/452/4/042097
7. Nozhenkova L. F., Isaeva O. S., Vogorovskiy R. V. Automation of spacecraft onboard equipment testing // International Conference on Advanced Material Science and Environmental Engineering. 2016. P. 215–217. doi:10.2991/amsee-16.2016.57
8. El-Bayoumi A., Salem M. A., Khalil A., El-Emam E. A new Checkout-and-Testing-Equipment (CTE) for a satellite telemetry using LabVIEW // 2015 IEEE Aerospace Conference. 2015. P. 1–9. doi:10.1109/AERO.2015.7119305

¹ ГОСТ Р 58675–2019. Автоматизированная система управления данными об изделии. Общие требования.

9. Комаров В. А., Семкин П. В. Разработка архитектуры эмулятора интерфейсных модулей сопряжения систем жизнеобеспечения космических аппаратов // Сибирский журнал науки и технологий. 2019. Т. 20, № 2. С. 228–235. doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-2-228-235
10. Горностаев А. И., Капустин А. Н., Зубавичус В. А., Колесников С. М. Применение магистрально-модульного принципа при построении бортовой аппаратуры бортового комплекса управления космических аппаратов // Решетневские чтения : материалы XIII Междунар. науч. конф. Красноярск : Сиб. гос. аэрокосм. ун-т, 2009. Ч. 1. С. 20–22.
11. Прудков В. В. Процедуры автоматизации процесса верификации подсистем блока управления перспективных космических аппаратов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М. Ф. Решетнева. 2011. № 1. С. 62–64.
12. Патент РФ 2 716 389 РФ, МПК G 05 В 23/00, G 06 F 11/00. Способ построения вычислительного процесса испытаний аппаратуры с мультинтерфейсным взаимодействием / В. В. Прудков ; № 2019108806; заявл. 26.03.2019; опубл. 11.03.2020, Бюл. № 8. 2 с.
13. Сунцов С. Б., Клишкин О. А., Сарафанов А. В. [и др.]. Инженерный анализ при сквозном автоматизированном проектировании радиоэлектронной аппаратуры модульной ракетно-космической техники // Технология машиностроения. 2011. № 5. С. 54–56.
14. Кочура С. Г., Школьный В. Н., Сунцов С. Б. [и др.]. Технологии информационной поддержки жизненного цикла бортовой радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической техники // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. 2017. № 3. С. 364–371.
15. Комаров В. А., Сарафанов А. В., Тумковский С. Р. Опыт цифровой трансформации бизнес-процессов прикладных экспериментальных исследований посредством мультиарендности их ресурсного обеспечения // Информационные технологии. 2021. № 1. С. 41–50.

References

1. Pichkalev A.V. Ground-based debugging complex of onboard electronic equipment. *Reshetnevskie chteniya: materialy XIV Mezhdunar. nauch. konf = Reshetnev readings : materials of the XIV International scientific conference*. Krasnoyarsk: Sib. gos. aerokosm. un-t, 2010;2:515–516. (In Russ.)
2. Komarov V.A., Pichkalev A.V. Application of NI FPGA technologies in testing of onboard spacecraft equipment. *Intellect i nauka: tr. XI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (g. Zheleznogorsk, 28–29 aprelya 2011 g.) = Intellect and Science : tr. XI International Scientific and Practical Conference (Zheleznogorsk, April 28–29, 2011)*. Krasnoyarsk: Tsentr informatsii, 2011:146–148. (In Russ.)
3. Tyugashev A.A. Approach to ensuring fault tolerance of spacecraft based on automation of design of intelligent onboard software. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2016;(2):9–16. (In Russ.)
4. Bubnov O.V., Kremzukov Yu.A., Pchel'nikov V.A. et al. Automated workplace for testing and testing of power-generating equipment of the spacecraft power supply system. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki = Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics*. 2017;20(3):35–39. (In Russ.). doi:10.21293/1818-0442-2017-20-3-35-39
5. Lomaev Yu.S., Ivanov I.A., Tolstykh A.V., Islent'ev E.V. Application of software and mathematical models of on-board equipment in the development of on-board software. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii = Siberian Journal of Science and Technology*. 2019;20(2):166–173. (In Russ.). doi:10.31772/2587-6066-2019-20-2-166-173
6. Li J., Xiao M., Kang W., Lv Y. Research on reconfigurable instrument technology of portable test system of missiles. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;452(12). doi:10.1088/1757-899x/452/4/042097
7. Nozhenkova L.F., Isaeva O.S., Vogorovskiy R.V. Automation of spacecraft onboard equipment testing. *International Conference on Advanced Material Science and Environmental Engineering*. 2016:215–217. doi:10.2991/amsee-16.2016.57
8. El-Bayoumi A., Salem M.A., Khalil A., El-Emam E.A. A new Checkout-and-Testing-Equipment (CTE) for a satellite telemetry using LabVIEW. *2015 IEEE Aerospace Conference*. 2015:1–9. doi:10.1109/AERO.2015.7119305
9. Komarov V.A., Semkin P.V. Development of the emulator architecture of interface modules for interfacing life support systems of spacecraft. *Sibirskiy zhurnal nauki i tekhnologii = Siberian Journal of Science and Technology*. 2019;20(2):228–235. (In Russ.). doi: 10.31772/2587-6066-2019-20-2-228-235
10. Gornostaev A.I., Kapustin A.N., Zubavichus V.A., Kolesnikov S.M. Application of the trunk-modular principle in the construction of onboard equipment of the onboard control complex of spacecraft. *Reshetnevskie chteniya: materialy XIII Mezhdunar. nauch. konf. = Reshetnev readings : materials of the XIII International scientific conference*. Krasnoyarsk: Sib. gos. aerokosm. un-t, 2009;1:20–22. (In Russ.)
11. Prudkov V.V. Procedures for automating the verification process of subsystems of the control unit of advanced spacecraft. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta imeni akademika M. F. Reshetneva = Bulletin of the Siberian State Aerospace University named after Academician M.F. Reshetnev*. 2011;(1):62–64. (In Russ.)

12. Patent Russian Federation 2 716 389 RF, MPK G 05 B 23/00, G 06 F 11/00. *Sposob postroeniya vychislitel'nogo protsesssa ispytaniy apparatury s mul'tinterfeysnym vzaimodeystviem = A method for constructing a computational process for testing equipment with multi-interface interaction.* V.V. Prudkov; № 2019108806; appl. 26.03.2019; publ. 11.03.2020, Bull. № 8. 2 s. (In Russ.)
13. Suntsov S.B., Klimkin O.A., Sarafanov A.V. et al. Engineering analysis in end-to-end automated design of radio-electronic equipment of modular rocket and space technology. *Tekhnologiya mashinostroeniya = Technology of mechanical engineering.* 2011;(5):54–56. (In Russ.)
14. Kochura S.G., Shkol'nyy V.N., Suntsov S.B. et al. Technologies of information support of the life cycle of onboard radio-electronic equipment of rocket and space technology. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii = Journal of the Siberian Federal University. Equipment and technologies.* 2017;(3):364–371. (In Russ.)
15. Komarov V.A., Sarafanov A.V., Tumkovskiy S.R. Experience of digital transformation of business processes of applied experimental research through multi-tenancy of their resource provision. *Informatsionnye tekhnologii = Information technologies.* 2021;(1):41–50. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Александрович Комаров

доктор технических наук, доцент,
профессор базовой кафедры радиоэлектронной
техники информационных систем,
Сибирский федеральный университет
(Россия, г. Красноярск, Свободный просп., 79);
начальник группы управления проектирования
космических систем, комплексов связи, ретрансляции,
Информационные спутниковые системы
имени академика М. Ф. Решетнева
(Россия, Красноярский край,
г. Железногорск, ул. Ленина, 52)
E-mail: vkomarov@iss-reshetnev.ru

Альберт Викторович Сарафанов

доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры приборостроения и электроники,
Сибирский федеральный университет,
(Россия, г. Красноярск, Свободный просп., 79);
директор по развитию бизнеса,
департамент систем управления предприятиями,
Витте Консалтинг (ГК «АЙ-ТЕКО»),
(Россия, г. Москва, ул. Кедрова, 15)
E-mail: sarafanov@i-teco.ru

Vladimir A. Komarov

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the base sub-department units
of radioelectronic engineering of information systems,
Siberian Federal University
(79 Svobodnyy avenue, Krasnoyarsk, Russia);
head of the group of the department for the design
of space systems, communication complexes, relaying,
Information Satellite Systems
named after Academician M.F. Reshetnev
(52 Lenina street, Zheleznogorsk,
Krasnoyarsk region, Russia)

Albert V. Sarafanov

Doctor of technical sciences, professor,
professor of the sub-department
of instrumentation and electronics,
Siberian Federal University
(79 Svobodnyy avenue, Krasnoyarsk, Russia);
business development director,
department of enterprise management systems,
Witte Consulting (IG-TEKO Group)
(15 Kedrova street, Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 21.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 20.01.2022

Принята к публикации/Accepted 22.02.2022

МУЛЬТИКРИТЕРИАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗЫ НОРМАЛЬНОСТИ И РАВНОМЕРНОСТИ МАЛЫХ ВЫБОРОК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРОИЧНЫХ И ДВОИЧНЫХ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОНОВ

А. И. Иванов¹, А. П. Юнин², А. П. Иванов³, Е. Н. Куприянов⁴, С. А. Полковникова⁵

^{1,2} Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт, Пенза, Россия

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

¹ivan@pniei.penza.ru, ²unin_ap@pniei.penza.ru, ³ap_ivanov@pnzgu.ru,
⁴evgnkupr@gmail.com, ⁵1996svetlanaserikova@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассматривается проблема совместного использования трех критериев проверки гипотезы равномерности и нормальности: Фроцини (1978), Али – Черго – Ревиса (1992) и дифференциального варианта критерия Фроцини (2016). *Материалы и методы.* Предложено каждому из исследуемых критериев поставить в соответствие эквивалентный искусственный нейрон. Тогда нейросеть из трех бинарных нейронов дает трехбитный выходной код. Сеть из троичных нейронов будет выдавать шестибитный выходной код. Избыточные выходные коды нейросетей могут быть свернуты с корректировкой ошибок. *Результаты.* Показано, что бинарные искусственные нейроны позволяют различать малые выборки в 16 опытов с нормальным или равномерным распределением при одинаковых вероятностях ошибок первого и второго рода – 0,031. Троичные нейроны дают одинаковые вероятности ошибок первого и второго рода на уровне – 0,2303. Из-за независимости данных (спектры расстояний Хэмминга не перекрываются) возможно снижение вероятности ошибок до величины – 0,007. *Выводы.* Известные кодовые конструкции с избыточностью, способные обнаруживать и исправлять ошибки, создавались в основном под бинарные коды. Троичные кодовые конструкции слабо исследованы. Необходимо не только развивать ветвь троичных самокорректирующихся кодов, но и кодовую надстройку, объединяющую двоичные и троичные нейросетевые самокорректирующиеся конструкции.

Ключевые слова: статистические критерии, искусственные нейроны эквивалентные статистическим критериям, корректировка ошибок выходного кода нейросети

Для цитирования: Иванов А. И., Юнин А. П., Иванов А. П., Куприянов Е. Н., Полковникова С. А. Мультикритериальная проверка гипотезы нормальности и равномерности малых выборок с использованием троичных и двоичных искусственных нейронов // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 70–77. doi:10.21685/2307-4205-2022-3-9

MULTI-CRITERIA VERIFICATION OF THE HYPOTHESIS OF NORMALITY AND UNIFORMITY OF SMALL SAMPLES USING TERNARY AND BINARY ARTIFICIAL NEURONS

A.I. Ivanov¹, A.P. Yunin², A.P. Ivanov³, E.N. Kupriyanov⁴, S.A. Polkovnikova⁵

^{1,2} Penza Research Electrotechnical Institute, Penza, Russia

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

¹ivan@pniei.penza.ru, ²unin_ap@pniei.penza.ru, ³ap_ivanov@pnzgu.ru,
⁴evgnkupr@gmail.com, ⁵1996svetlanaserikova@gmail.com

Abstract. *Background.* The problem of joint use of three criteria for testing the hypothesis of uniformity and normality is considered: Frotsini (1978), Ali – Chergo – Revis (1992) and a differential version of the Frotsini test (2016). *Materials and methods.* It is proposed to match each of the studied criteria with an equivalent artificial neuron. Then a neural network of three binary neurons gives a three-bit output code. A network of ternary neurons will produce a six-bit output code. Redundant output codes of neural networks can be convolved with error correction. *Results.* It is shown that binary artificial neurons make it possible to distinguish between small samples of 16 experiments with a normal or uniform distribution with the same probabilities of errors of the first and second kind – 0,031. Ternary neurons give the same probabilities of errors of the first and second kind at the level of – 0,2303. Due to the independence of the data (Hamming distance spectra do not overlap), it is possible to reduce the error probability to a value of – 0,007. *Conclusions.* Known code structures with redundancy, capable of detecting and correcting errors, were created mainly for binary codes. Ternary code constructions are poorly studied. It is necessary not only to develop a branch of ternary self-correcting codes, but also a code superstructure that combines binary and ternary neural network self-correcting structures.

Keywords: statistical criteria, artificial neurons equivalent to statistical criteria, error correction of the neural network output code

For citation: Ivanov A.I., Yunin A.P., Ivanov A.P., Kupriyanov E.N., Polkovnikova S.A. Multi-criteria verification of the hypothesis of normality and uniformity of small samples using ternary and binary artificial neurons. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(3):70–77. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-3-9

Введение

Классические статистические критерии [1] при их создании были ориентированы на выборки в 200 и более опытов¹. Эта ситуация вполне устраивала практиков до момента активного развития нейросетевой биометрии [2, 3]. Обучать нейронные сети преобразованию биометрия-код приходится на малых выборках в 16 примеров образа «Свой». При этом перспективные алгоритмы быстрого автоматического обучения нейронов, предположительно, должны строиться на подборе 16 биометрических параметров образа «Свой» с нормальным распределением для нейронов состояния «0» [4]. Для нейронов состояния «1» подбираются биометрические параметры с равномерным распределением. При этом используемые искусственные нейроны должны уметь с высокой достоверностью различать малые выборки с нормальным либо с равномерным распределениями.

Рассмотрим ситуацию использования в качестве перспективного искусственного нейрона классического статистического критерия Фроцини [5], синтезированного в 1978 г. Возможности этого критерия по отношению к малым выборкам в 16 опытов могут быть оценены численным экспериментом. Программное обеспечение на языке MathCAD приведено на рис. 1.

$ \begin{array}{l} \text{sx} := \left\{ \begin{array}{l} x \leftarrow \text{sort}(\text{morm}(16,0,1)) \\ m \leftarrow \text{mean}(x) \\ \sigma \leftarrow \text{stdev}(x) \\ \text{Fr} \leftarrow \sum_{i=0}^{15} \left[\frac{\left \text{pnorm}(x_i, m, \sigma) - \frac{i-0.5}{16} \right }{(\text{dnorm}(x_i, m, \sigma))^{-1}} \right] \\ \text{Fr} \end{array} \right. \end{array} $	$ \begin{array}{l} \text{sx1} := \left\{ \begin{array}{l} x \leftarrow \text{sort}(\text{runif}(16,-3,3)) \\ m \leftarrow \text{mean}(x) \\ \sigma \leftarrow \text{stdev}(x) \\ \text{Fr} \leftarrow \sum_{i=0}^{15} \left[\frac{\left \text{pnorm}(x_i, m, \sigma) - \frac{i-0.5}{16} \right }{(\text{dnorm}(x_i, m, \sigma))^{-1}} \right] \\ \text{Fr} \end{array} \right. \end{array} $
---	--

Рис. 1. Программное обеспечение моделирования критерия Фроцини при воздействии нормальных данных (левая часть рисунка) и при воздействии равномерно распределенных данных (правая часть рисунка)

Результаты численного моделирования приведены на рис. 2, где дополнительно приведены состояния выходного квантователя нейрона Фроцини.

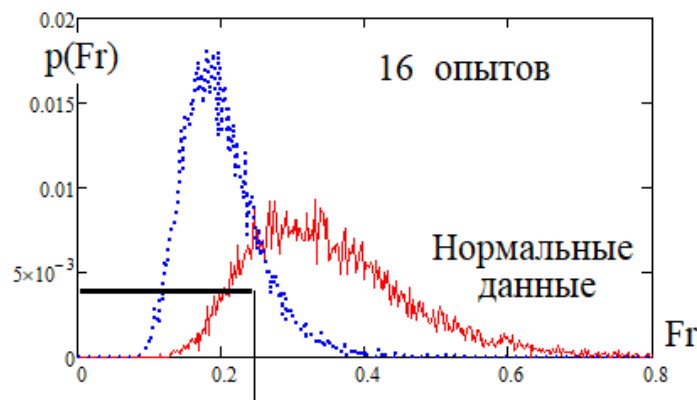


Рис. 2. Распределение выходных состояний искусственного нейрона, работа которого эквивалентна критерию Фроцини 1978 г.

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

Обычно к статистическим критериям [1] прилагаются соответствующие таблицы оценки доверительных вероятностей для тех или иных условий принятия решений. В нашем случае применение подобных таблиц не совсем удобно. Так как мы рассматриваем задачу разделения двух типов данных (нормальных или равномерных), целесообразно выставлять порог принятия решений $k = 0,24$, обеспечивающий равновероятные ошибки первого и второго рода $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,174$.

Один из самых мощных статистических критериев создан в 1992 г. [6]. Критерий Али – Черго – Ревиса позволяет снизить вероятности ошибок до величины $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,101$. Программное обеспечение для его моделирования и результат численного моделирования приведены на рис. 3.

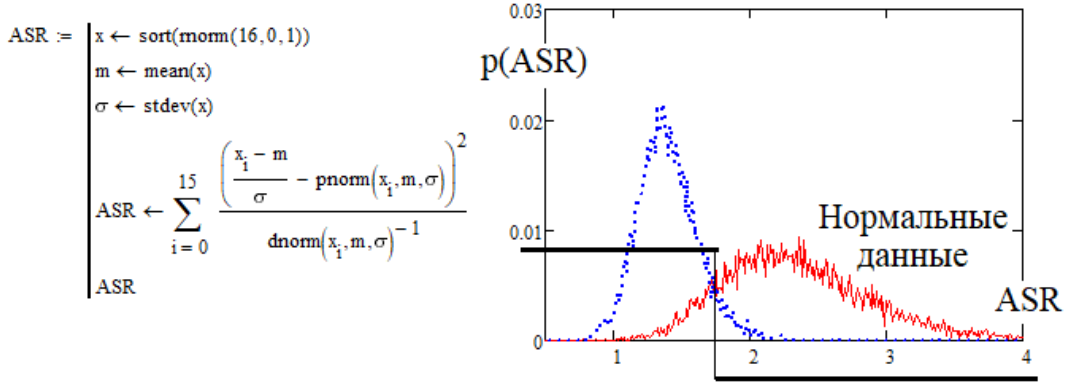


Рис. 3. Критерий Али – Черго – Ревиса и эквивалентный ему бинарный нейрон с порогом принятия решений $k = 0,171$

Исследования по созданию мощных статистических критериев велись не только в прошлом веке. В этом веке был создан дифференциальный вариант критерия Фроцини [7–9], позволивший снизить вероятности ошибок до величины $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,037$ при пороге принятия решения $k = 0,83$. Программное обеспечение и результаты численного эксперимента по моделированию нового критерия приведены на рис. 4.

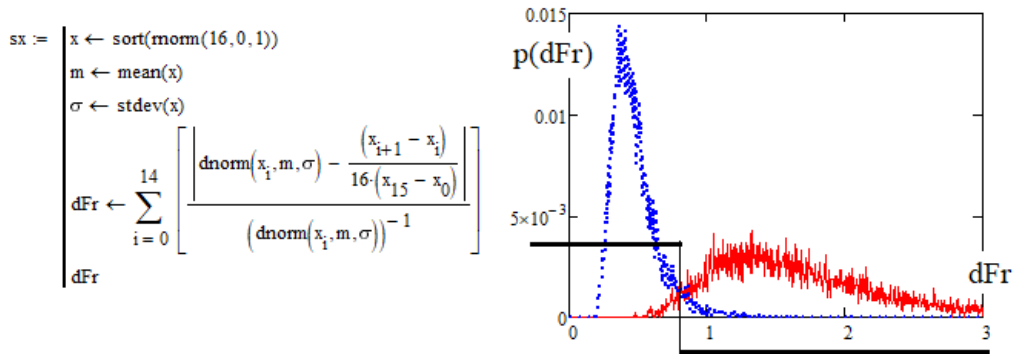


Рис. 4. Бинарный нейрон дифференциального аналога классического критерия Фроцини

Объединение трех статистических критериев через использование простейших искусственных нейронов с бинарным квантованием

Так как каждый из описанных выше искусственных нейронов имеет недостаточную мощность (дает неприемлемо высокие вероятности ошибок), их следует использовать совместно [10–12]. Принципиальная возможность такого обобщения обусловлена тем, что коэффициенты парной корреляции существенно меньше единицы: $corr(Fr, ASR) \approx 0,126$, $corr(ASR, dFr) \approx 0,594$, $corr(Fr, dFr) \approx 0,749$, т.е. разряды выходного кода имеют существенные независимые компоненты. В идеальном случае, когда все три критерия воспринимают данные как нормальные, мы имеем код «000». Если какой-то один из критериев принимает решение об обнаружении равномерного распределения данных, то в одном из разрядов кода появляется состояние «1».

Простейший алгоритм свертывания кодовой избыточности [10–12] сводится к подсчету состояний «0» в коде. Коды с тремя состояниями «0» и двумя состояниями «0» рассматриваются как до-

пустимые. Все иные коды отбрасываются как ошибочные. Для анализа таких самокорректирующихся кодов удобными являются линии спектра амплитуд расстояний Хэмминга между кодом «000» и иными кодовыми состояниями. На рис. 5 представлен спектр линий амплитуд вероятности появления разных расстояний Хэмминга.

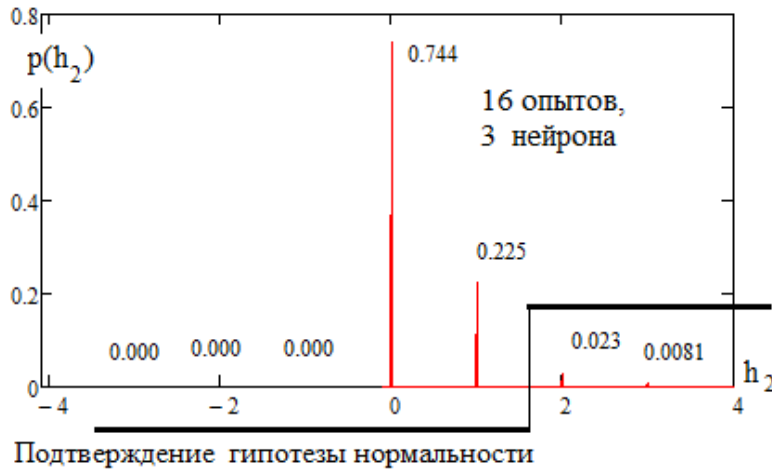


Рис. 5. Спектр линий амплитуд вероятности появления расстояний Хэмминга

Из рис. 5 видно, что спектр линий расстояний Хэмминга для бинарных кодов с трехкратной избыточностью имеет только линии с положительными ординатами. При этом самый лучший критерий dFr имеет $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,037$, а после устранения ошибок при свертывании избыточности получаем $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,031$. Наблюдается ощутимое снижение вероятности ошибок на 19,4 %.

Использование троичных искусственных нейронов при объединении трех статистических критериев

Очевидно, что мы всегда можем заменить бинарный выходной квантователь искусственного нейрона с одним порогом (см. рис. 2–4) на более сложный квантователь с двумя порогом сравнения. Соответствующие изменения состояний нейронов отображены на рис. 6.

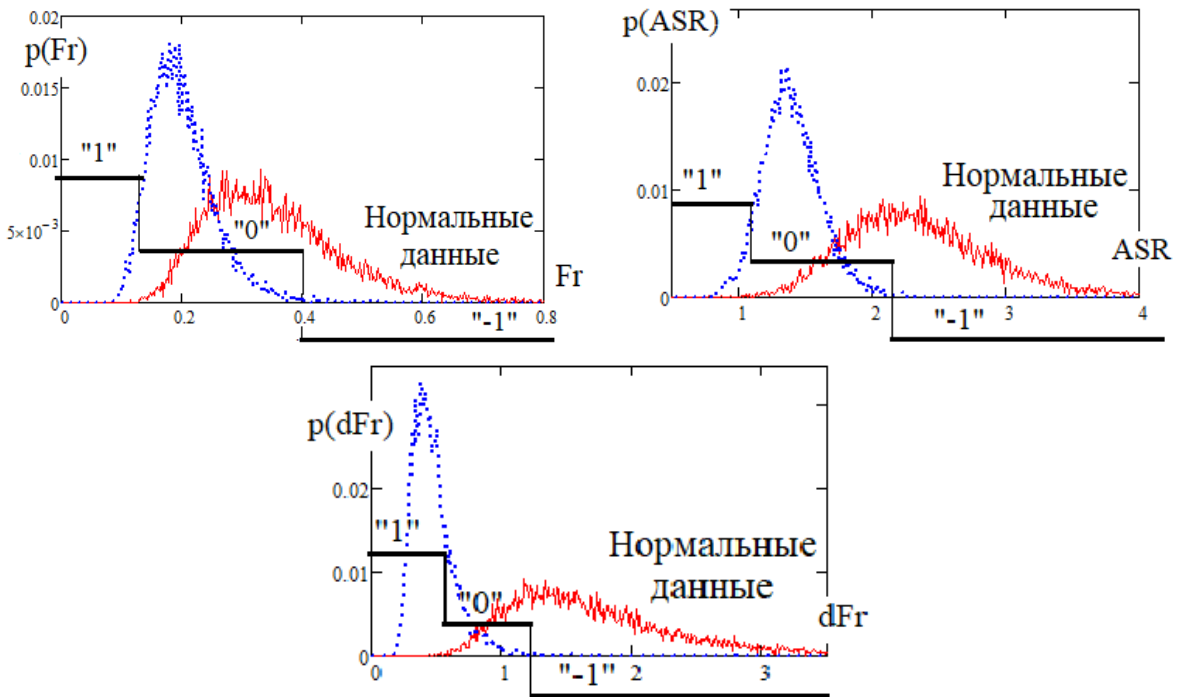


Рис. 6. Троичное квантование выходных данных нейронов сравнением с двумя порогом: $Fr(k_1 \approx 0,11, k_2 \approx 0,41)$, $ASR(k_1 \approx 0,81, k_2 \approx 1,1)$, $dFr(k_1 \approx 0,45, k_2 \approx 1,21)$

По аналогии с предыдущим свертыванием кодов мы можем построить аналогичный троичный свертыватель, для которого идеальным будет код с тремя отрицательными единичными состояниями «-1, -1, -1». Спектр амплитуд вероятности расстояний Хэмминга по отношению к коду «-1, -1, -1» отображен на рис. 7.

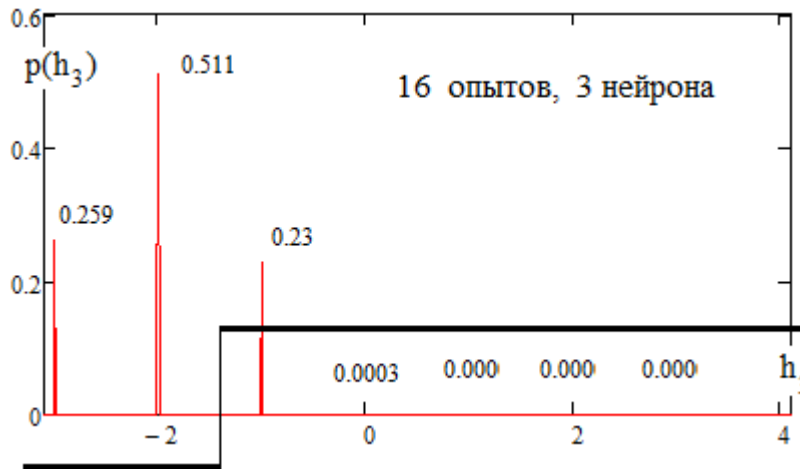


Рис. 7. Спектр расстояний Хэмминга, вычисленных по модулю три, возникающий для кодов трех объединяемых троичных нейронов

Из рис. 7 следует, что троичный самокорректирующийся код работает много хуже каждого нейрона из рассмотренных выше бинарных нейронов. Вероятность ошибок троичного корректора составляет $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,2303$. Это хуже аналогичного показателя $-0,171$ самого слабого из бинарных нейронов. Тем не менее это ухудшение на троичной части корректора не играет фатальной роли. Дело в том, что спектры рис. 5 и 7 не имеют общих линий. Это означает, что ошибки бинарного корректора и ошибки троичного корректора слабо коррелированы [15–17]. Как результат, теоретически может быть построен еще один уровень обобщающей корректировки кодов над уровнем корректировки бинарных нейронов и уровнем корректировки кодов троичных нейронов. Как реализовывать такой корректор, пока неизвестно, однако теоретически он может снизить вероятности ошибок $P_1 \approx P_2 \approx P_{EE} \approx 0,007$, что соответствует снижению вероятности ошибок примерно в 4,3 раза.

Заключение

В прошлом веке под нужды помехоустойчивой связи были созданы десятки разных кодовых конструкций. Эти кодовые конструкции в большинстве своем были ориентированы на бинарную систему счисления с достаточной избыточностью. Анализ первоисточников показал, что троичные самокорректирующиеся кодовые конструкции с избыточностью слабо изучены. Авторы данной работы на конкретном примере нейросетевого объединения трех статистических критериев попытались показать, что спектры расстояний Хэмминга для троичных нейронов и двоичных нейронов практически не пересекаются. Это открывает широкие возможности для дальнейших исследований. Прежде всего, следует более глубоко исследовать самокорректирующиеся нейросетевые кодовые конструкции, построенные в разных системах счисления. В этом контексте даже снижение вероятностных показателей в одной избыточной нейрокорректирующей кодовой конструкции может оказаться полезным.

В рассмотренном нами случае троичный нейрокодировщик с троичной избыточностью работает примерно в полтора раза хуже самого слабого бинарного одиночного нейрона. Тем не менее слабая коррелированность ошибок троичных и двоичных нейрокорректоров теоретически позволяет увеличить общий уровень их совместной корректирующей способности в 4,3 раза.

В живой природе все естественные нейроны имеют многоуровневые квантователи [14] и постоянно находятся в динамике шумоподобных состояний [15]. При этом возникающие в естественных нейронах живых существ, процессы кодирования данных с преобразованием их в пачки нескольких импульсов сложны и пока не понятны. В этом контексте работы, связанные с использованием нейрокорректоров нейрокодов в разных системах счисления (двоичных, троичных, пятеричных, ..., Q -х и их комбинаций), будут актуальны достаточно долго.

Список литературы

1. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.
2. Волчихин В. И., Иванов А. И., Назаров И. Г. [и др.]. Нейросетевая защита персональных биометрических данных. М. : Радиотехника, 2012. 160 с.
3. Ахметов Б. С., Иванов А. И., Фунтиков В. А. [и др.]. Технология использования больших нейронных сетей для преобразования нечетких биометрических данных в код ключа доступа. Алматы : ТОО «Издательство LEM», 2014. 144 с.
4. Иванов А. И., Куприянов Е. Н. Защита искусственного интеллекта: ортогонализация статистико-нейросетевого анализа малых выборок биометрических данных : препринт. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. 72 с.
5. Frozini B. V. A survey of class of goodness-of-fit statistics // *Metron*. 1978. Vol. 36, № 1-2. P. 3–49.
6. Aly E.-E., Shayib M. A. On some goodness-of-fit tests for normal, logistic and extreme-value distributions // *Communications in Statistics-Theory and Methods*. 1992. Vol. 21, № 5. P. 1297–1308.
7. Иванов А. И. Многомерная нейросетевая обработка биометрических данных с программным воспроизведением эффектов квантовой суперпозиции. Пенза : ПНИЭИ, 2016. 133 с.
8. Волчихин В. И., Иванов А. И., Перфилов К. А. [и др.]. Быстрый алгоритм обучения больших сетей искусственных нейронов квадрата среднего геометрического плотностей распределения значений многомерных биометрических данных // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2018. № 3. С. 23–35.
9. Иванов А. И., Малыгин А. Ю., Полковникова С. А. Удвоение числа статистических критериев семейства Крамера – фон Мизеса дифференцированием малых выборок с нормальным и равномерным распределением биометрических данных // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2022. № 1. С. 53–61.
10. Иванов А. И., Банных А. Г., Безяев А. В. Искусственные молекулы, собранные из искусственных нейронов, воспроизводящих работу классических статистических критериев // *Вестник Пермского университета. Сер.: Математика. Механика. Информатика*. 2020. № 1. С. 26–32.
11. Иванов А. И., Иванов А. П., Куприянов Е. Н. Мультипликативно-нейросетевое объединение статистических критериев Херста и Мурота – Такеучи при проверке гипотезы нормальности малых выборок // *Надежность и качество сложных систем*. 2021. № 4. С. 27–33. doi:10.21685/2307-4205-2021-4-4
12. Иванов А. П., Иванов А. И., Малыгин А. Ю. [и др.]. Альбом из девяти классических статистических критериев для проверки гипотезы нормального или равномерного распределения данных малых выборок // *Надежность и качество сложных систем*. 2022. № 1. С. 20–29.
13. Иванов А. И., Юнин А. П. Эмбрион искусственного интеллекта: компактная нейросетевая проверка качества случайных последовательностей, полученных из биометрических данных : препринт. Пенза : Изд-во ПГУ, 2021. 68 с.
14. Малыгина Е. А. Биометрико-нейросетевая аутентификация: перспективы применения сетей квадратичных нейронов с многоуровневым квантованием биометрических данных : препринт. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. 114 с.
15. Иванов А. И. Нейродинамика: гиперускорение направленных переборов или повышение достоверности статистических оценок на малых выборках : препринт. Пенза : Изд-во ПГУ, 2021. 106 с.

References

1. Kobzar' A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov = Applied mathematical statistics. For engineers and researchers*. Moscow: FIZMATLIT, 2006:816. (In Russ.)
2. Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Nazarov I.G. et al. *Neyrosetevaya zashchita personal'nykh biometricheskikh dannykh = Neural network protection of personal biometric data*. Moscow: Radiotekhnika, 2012:160. (In Russ.)
3. Akhmetov B.S., Ivanov A.I., Funtikov V.A. et al. *Tekhnologiya ispol'zovaniya bol'shikh neyronnykh setey dlya preobrazovaniya nechetkikh biometricheskikh dannykh v kod klyucha dostupa = Technology of using large neural networks to convert fuzzy biometric data into an access key code*. Almaty: TOO «Izdatel'stvo LEM», 2014:144. (In Russ.)
4. Ivanov A.I., Kupriyanov E.N. *Zashchita iskusstvennogo intellekta: ortogonalizatsiya statistiko-neyrosetevogo analiza malykh vyborok biometricheskikh dannykh: preprint = Protection of artificial intelligence: orthogonalization of statistical neural network analysis of small samples of biometric data : preprint*. Penza: Izd-vo PGU, 2020:72. (In Russ.)
5. Frozini B.V. A survey of class of goodness-of-fit statistics. *Metron*. 1978;36(1-2):3–49.
6. Aly E.-E., Shayib M.A. On some goodness-of-fit tests for normal, logistic and extreme-value distributions. *Communications in Statistics-Theory and Methods*. 1992;21(5):1297–1308.
7. Ivanov A.I. *Mnogomernaya neyrosetevaya obrabotka biometricheskikh dannykh s programmym vosproizvedeniem effektivov kvantovoy superpozitsii = Multidimensional neural network processing of biometric data with software reproduction of quantum superposition effects*. Penza: PNIEI, 2016:133. (In Russ.)

8. Volchikhin V.I., Ivanov A.I., Perfilov K.A. et al. Fast algorithm for training large networks of artificial neurons of the square of the geometric mean density distribution of values of multidimensional biometric data. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences.* 2018;(3):23–35. (In Russ.)
9. Ivanov A.I., Malygin A.Yu., Polkovnikova S.A. Doubling the number of statistical criteria of the Kramer–von Mises family by differentiating small samples with a normal and uniform distribution of biometric data. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskie nauki = Proceedings of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences.* 2022;(1):53–61. (In Russ.)
10. Ivanov A.I., Bannykh A.G., Bezyaev A.V. Artificial molecules assembled from artificial neurons reproducing the work of classical statistical criteria. *Vestnik Permskogo universiteta. Ser.: Matematika. Mekhanika. Informatika = Bulletin of Perm University. Ser.: Matematika. Mechanics. Computer science.* 2020;(1):26–32. (In Russ.)
11. Ivanov A.I., Ivanov A.P., Kupriyanov E.N. Multiplicative neural network association of statistical Hurst and Murota–Takeuchi criteria when testing the hypothesis of normality of small samples. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(4):27–33. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2021-4-4
12. Ivanov A.P., Ivanov A.I., Malygin A.Yu. et al. Album of nine classical statistical criteria for testing the hypothesis of normal or uniform distribution of small sample data. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(1):20–29. (In Russ.)
13. Ivanov A.I., Yunin A.P. *Embrion iskusstvennogo intellekta: kompaktnaya neyrosetevaya proverka kachestva sluchaynykh posledovatel'nostey, poluchennykh iz biometricheskikh dannykh: preprint = Artificial intelligence embryo: compact neural network quality control of random sequences obtained from biometric data : preprint.* Penza: Izd-vo PGU, 2021:68. (In Russ.)
14. Malygina E.A. *Biometriko-neyrosetevaya autentifikatsiya: perspektivy primeneniya setey kvadratichnykh neyronov s mnogourovnevnyim kvantovaniem biometricheskikh dannykh : preprint = Biometric-neural network authentication: prospects for the use of networks of quadratic neurons with multilevel quantization of biometric data : preprint.* Penza: Izd-vo PGU, 2020:114. (In Russ.)
15. Ivanov A.I. *Neyrodinamika: giperuskorenie napravlenykh pereborov ili povyshenie dostovernosti statisticheskikh otsenok na malyykh vyborkakh: preprint = Neurodynamics: hyper-acceleration of directed searches or increasing the reliability of statistical estimates on small samples : preprint.* Penza: Izd-vo PGU, 2021:106. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Иванович Иванов

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

Алексей Петрович Юнин

ведущий специалист,
Пензенский научно-исследовательский
электротехнический институт
(Россия, г. Пенза, ул. Советская, 9)
E-mail: unin_ar@pniei.penza.ru

Алексей Петрович Иванов

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

Aleksandr I. Ivanov

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

Aleksey P. Yunin

Leading specialist,
Penza Research Electrotechnical Institute
(9 Sovetskaya street, Penza, Russia)

Aleksey P. Ivanov

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

Евгений Николаевич Куприянов

аспирант,

Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: evgnkupr@gmail.com

Evgeniy N. Kupriyanov

Postgraduate student,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Светлана Андреевна Полковникова

аспирант,

Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)

E-mail: 1996svetlanaserikova@gmail.com

Svetlana A. Polkovnikova

Postgraduate student,

Penza State University

(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 20.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 21.01.2022

Принята к публикации/Accepted 18.02.2022

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО ДИАМЕТРА ВОЗДУХОЗАБОРНИКА ДВИГАТЕЛЬНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ МАЛЫХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Д. Д. Белов¹, В. В. Дюдина², В. В. Сапрыкин³, В. В. Задорожный⁴, П. М. Норов⁵

^{1,2,3,4,5} Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия
¹ belov@iu4.ru, ² Dyudina@iu4.ru, ³ apyrykin@iu4.ru, ⁴ Zadorozhnyy@iu4.ru, ⁵ Norov@iu4.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В связи с увеличением в РФ интереса к программам развития околоземных космических аппаратов проведены исследования оптимального диаметра сеточного канала воздухозаборника двигательной установки малого космического аппарата, работающего на заборном воздухе. *Материалы и методы.* Показано, что актуально использование класса безэлектродных двигателей на основе геликонного разряда. Получены экспериментальные графики зависимости эффективности работы воздухозаборника от его диаметра, а также представлены зависимости массового расхода частиц m от диаметра воздухозаборника. Дан анализ экологичности создания двигательной установки методом Environmental Input-Output (модели ввода–вывода). Проведена оценка вредности воздействия аппарата на окружающую среду во время его работы. *Результаты и выводы.* Установлена закономерность: расход в двигателе не меняется при постоянном отношении длины воздухозаборника к шагу сетки, что говорит о том, что отношение шага сетки к длине воздухозаборника является главным параметром, определяющим его эффективность. Отмечается безопасность проведения испытаний вышеописанной установки в лабораторных условиях. При этом появляется значительный углеродный след от использования данного оборудования.

Ключевые слова: космические аппараты, двигательные установки, рабочее тело, эрозия элементов, безэлектродный двигатель, модели ввода–вывода

Для цитирования: Белов Д. Д., Дюдина В. В., Сапрыкин В. В., Задорожный В. В., Норов П. М. Расчет оптимального диаметра воздухозаборника двигательной установки для малых космических аппаратов // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 78–85. doi:10.21685/2307-4205-2022-3-10

CALCULATION OF THE OPTIMAL DIAMETER OF THE AIR INTAKE OF THE PROPULSION SYSTEM FOR SMALL SPACECRAFT

D.D. Belov¹, V.V. Dyudina², V.V. Saprykin³, V.V. Zadorozhnyy⁴, P.M. Norov⁵

^{1,2,3,4,5} Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
¹ belov@iu4.ru, ² Dyudina@iu4.ru, ³ apyrykin@iu4.ru, ⁴ Zadorozhnyy@iu4.ru, ⁵ Norov@iu4.ru

Abstract. *Background.* In connection with the increasing interest in the Russian Federation in programs for the development of near-Earth spacecraft, studies have been carried out on the optimal diameter of the grid channel of the air intake of the propulsion system of a small spacecraft operating on outboard air. *Materials and methods.* It is shown that the use of a class of electrodeless motors based on a helicon discharge is relevant. Experimental graphs of the dependence of the efficiency of the air intake on its diameter are obtained, and the dependences of the mass flow rate of particles m on the diameter of the air intake are also presented. An analysis of the environmental friendliness of the creation of a propulsion system using the Environmental Input-Output method (Models of input-output) is given. *Results and conclusions.* An assessment of the harmfulness of the impact of the apparatus on the environment during its operation was carried out. A regularity has been established: the flow rate to the engine does not change at a constant ratio of the length of the air intake to the grid pitch, which indicates that the ratio of the grid pitch to the length of the air intake is the main parameter that determines its efficiency. The safety of testing the above-described installation in laboratory conditions is noted. This creates a significant carbon footprint from the use of this equipment.

Keywords: space vehicles, propulsion systems, working fluid, erosion of elements, electrodeless engine, input-output models

For citation: Belov D.D., Dyudina V.V., Saprykin V.V., Zadorozhnyy V.V., Norov P.M. Calculation of the optimal diameter of the air intake of the propulsion system for small spacecraft. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(3):78–85. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-3-10

Введение

В двигательных установках на заборном воздухе в качестве рабочего тела для электроракетного двигателя используются частицы остаточной атмосферы. Это позволяет компенсировать силу торможения, действующую на космический аппарат. Система теоретически позволяет спутнику находиться на орбите неограниченное количество времени без использования запаса рабочего тела. В системе на заборном воздухе могут использоваться различные типы двигателей, однако в большинстве из них существует ресурсное ограничение, связанное с эрозией отдельных элементов конструкции. Поэтому наиболее перспективными для использования являются безэлектродные двигатели, поскольку их элементы практически не подвержены эрозии.

Значительный интерес в классе безэлектродных двигателей представляет двигатель на основе геликонного разряда. Недавние исследования показали, что такие двигатели способны обеспечивать значительную тяговую эффективность и высокий удельный импульс благодаря эффективному вкладу электрической мощности в разряд и высокой степени ионизации рабочего тела по сравнению с другими безэлектродными двигателями. Различные новые технические решения позволили повысить его эффективность и составить в ряде задач конкуренцию классическим типам двигателей вроде Холловских и ионных. В настоящее время в соответствии с идеологией неограниченного ресурса геликонный двигатель является самым перспективным для использования в составе двигательной установки на заборном воздухе.

Типичная схема установки на заборном воздухе состоит из воздухозаборника, коллектора, электрического ракетного двигателя. Коллектор устанавливается для термализации частиц и уменьшения их обратного потока. Принцип его работы показан на рис. 1.



Рис. 1. Принцип работы коллектора

Принцип, показанный на рис. 1, основан на том, что вектор скорости собранных частиц приобретает случайное направление при их первом ударе внутри коллектора. Это затрудняет обратный ток частиц через входной канал, поскольку они часто испытывают большое количество столкновений со стенками канала, прежде чем уйдут обратно в окружающую среду.

Работу всей системы двигательной установки определяет воздухозаборник. Его важным параметром является диаметр. При выборе диаметра существуют два ограничения на размер. Минимальный диаметр воздухозаборника задается массовым расходом воздуха, при котором способен зажигаться геликонный разряд при приемлемом уровне вкладываемой мощности. Максимальный диаметр ограничен электрической мощностью, которая отводится под нужды электроракетного двигателя. Чем больше диаметр воздухозаборника, тем больше сила аэродинамического сопротивления и, соответственно, тем больше требуемая тяга двигателя и расход электроэнергии.

Основная часть

Расчеты параметров воздухозаборника проведены для двигательной установки, способной поддерживать орбиту малого космического аппарата на круговой орбите Земли высотой 200 км, сроком активного существования не менее 5 лет. Основной задачей аппарата является проведение радиолокационной разведки.

Расчет параметров воздухозаборника можно осуществить, рассмотрев баланс расходов воздуха, поступающего и уходящего из двигателя (рис. 2).

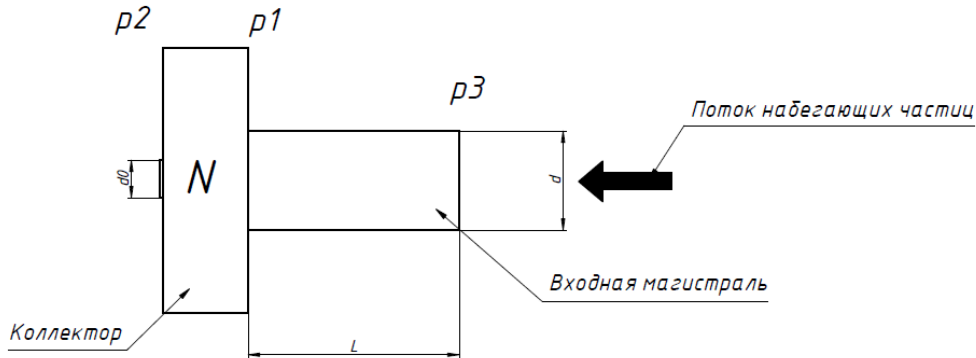


Рис. 2. Расчетная схема воздухозаборника

Примем допущения:

- набегающие частицы беспрепятственно попадают в воздухозаборник. Тогда мы можем рассмотреть задачу, в которой в объем коллектора N попадает заданный расход m . Этот расход при известной высоте полета будет зависеть только от входного диаметра воздухозаборника;
- поток набегающих частиц не взаимодействует с боковыми стенками начального тракта;
- обратный поток и поток частиц в двигатель – термализован;
- столкновения частиц друг с другом отсутствуют.

Обратный ток из воздухозаборника представлен тремя составляющими:

- термализованный поток, движимый градиентом давления;
- частицы, отраженные от стенок воздухозаборника;
- частицы, поменявшие свое направление на противоположное в результате соударения с другими частицами.

Очевидно, что чем больше степень повышения давления в воздухозаборнике, тем больший вклад вносит первая и третья составляющие.

Обратный ток из воздухозаборника определяется создавшейся в нем разницей давлений. Также при расчетах будем пренебрегать воздействием набегающего потока частиц, который уменьшает величину обратного тока. В этом случае для оценки потока мы можем использовать обычные уравнения вакуумной техники.

Поскольку набегающие частицы беспрепятственно попадают в воздухозаборник, мы можем рассмотреть задачу, в которой в объем коллектора N попадает заданный расход m . Этот расход при известной высоте полета будет зависеть только от входного диаметра воздухозаборника.

Из системы выходят два термализованных потока: поток в двигатель, зависящий от проводимости (диаметра) отверстия d_0 и перепада давления (степени сжатия в коллекторе); обратный поток в атмосферу. Воздухозаборник работает тем эффективнее, чем меньше обратная проводимость входной магистрали, поскольку она ограничивает величину обратного потока. Рассчитаем эффективность воздухозаборника, его длину. Поток набегающих частиц:

$$\dot{m}_m = \rho V \frac{\pi d^2}{4}. \quad (1)$$

Проводимость трубы при молекулярном режиме [1]:

$$U_m = 38,1 \frac{d^3}{L} \sqrt{\frac{T}{M}}. \quad (2)$$

Газовый поток при известной разнице давлений и проводимости магистрали определяется

$$Q = (p_1 - p_3)U, \quad (3)$$

где p_1 – давление в коллекторе; p_3 – давление за бортом КА.

Массовый расход \dot{m} связан с газовым потоком Q следующим образом:

$$Q = \frac{\dot{m}RT}{M}. \quad (4)$$

Эффективность сетчатого воздухозаборника определяется как отношение числа вошедших в него частиц к числу частиц, вышедших из двигателя [2] (рис. 3).

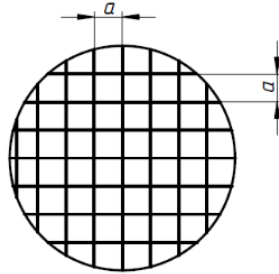


Рис. 3. Сеточный канал воздухозаборника

Эффективность воздухозаборника снижается за счет суммы двух потоков, выходящих через входное сечение: обратный термализованный поток частиц, поток геометрически отраженных частиц.

Оценить величину первого потока можно, считая известным давление в коллекторе и рассчитав проводимость магистрали. При этом считаем, что поток набегающих частиц не влияет на проводимость магистрали [3].

Проводимость отверстия при молекулярном режиме

$$U_{\text{ом}} = 28,6d_0^2 \sqrt{\frac{T}{M}}. \quad (5)$$

Поток натекания определяется как

$$Q = \frac{\dot{m}RT}{M}. \quad (6)$$

Тогда разница давлений

$$(p_1 - p_2) = \frac{Q}{U}. \quad (7)$$

Рассмотрим обратную проводимость сетчатого воздухозаборника. Количество ячеек внутри воздухозаборника можно получить как

$$K = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d}{a} \right)^2. \quad (8)$$

Считаем, что площадь всех ячеек, в том числе расположенных по радиусу, равна $F = a^2$ [4].

Тогда обратная проводимость воздухозаборника

$$U_{\text{kv}} = 38,1K \frac{a^3}{L} \sqrt{\frac{T}{M}} = 30,0 \frac{(ad^2)}{L} \sqrt{\frac{T}{M}}. \quad (9)$$

Отношение давлений

$$\frac{p_1}{p_3} = \frac{p_1}{p_2} = \frac{\dot{m}_{\text{in}}TR}{M(U_{\text{kv}} + U_{\text{ом}})}. \quad (10)$$

Отношение обратного потока и потока в двигатель равно отношениям соответствующих проводимостей [5, 6]. Тогда эффективность воздухозаборника

$$\eta_c = \frac{U_{om}}{(U_{kv} + U_{om})} = \frac{\dot{m}_{dv}}{\dot{m}_{in}}, \quad (11)$$

где \dot{m}_{dv} – массовый расход, попадающий в двигатель:

$$\dot{m}_{dv} = \eta_c \dot{m}_{in}.$$

Построим график зависимости массового расхода в двигатель от диаметра воздухозаборника (рис. 4, 5).

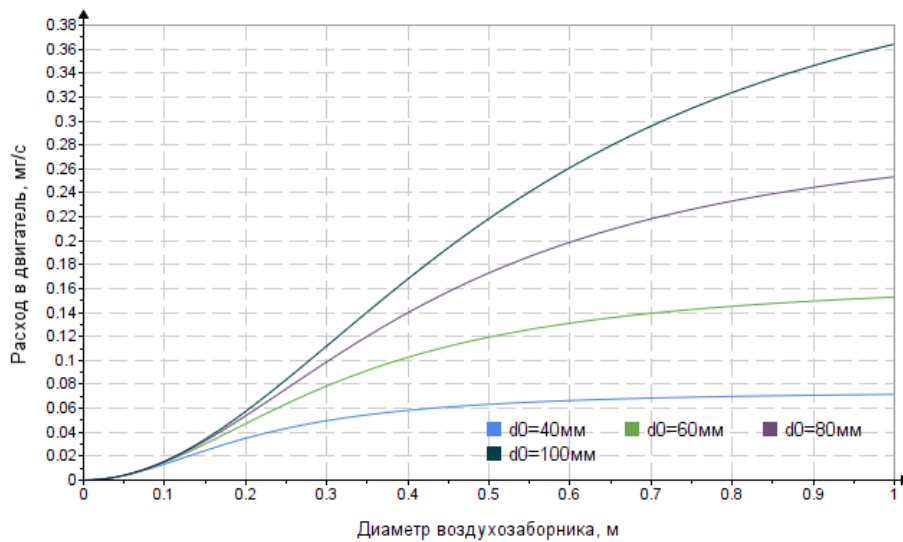


Рис. 4. Зависимость массового расхода от диаметра воздухозаборника

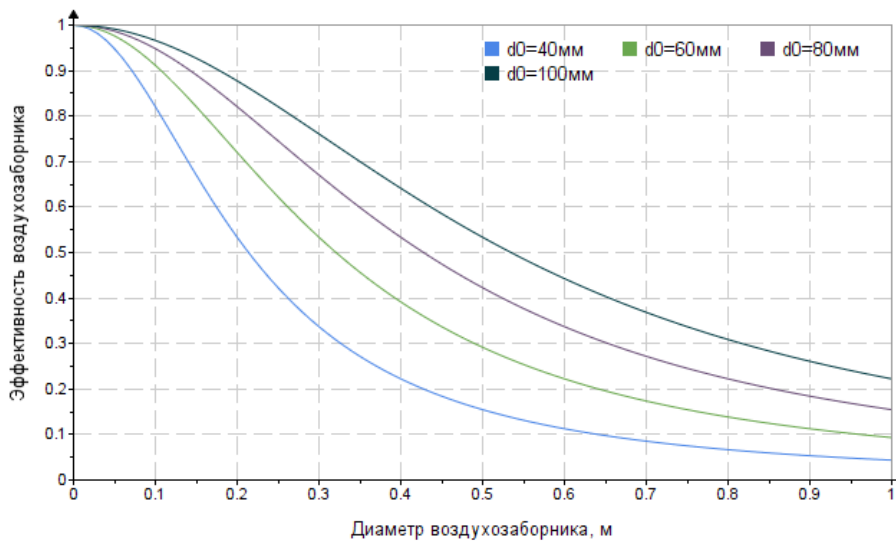


Рис. 5. Зависимость эффективности воздухозаборника от его диаметра

Оценка экологичности проведения испытаний

Вредными выбросами считаются вещества, которые при контакте с организмом человека могут вызывать заболевания или отклонения в состоянии здоровья как сразу после воздействия на организм, так и в отдаленные сроки жизни настоящего и последующих поколений.

Во время проведения эксперимента генерируемое двигательно-энергетической установкой ультрафиолетовое излучение среднего диапазона проходит через кварцевое оптическое окно, не испытывая значительных поглощений. Происходит наработка озона. Энергия ультрафиолетового излучения мала, и так как для ВЧ-плазмы характерные величины объемной концентрации составляют

$10^{17}-10^{18} \text{ м}^{-3}$, можно сделать вывод о том, что озон будет накапливаться в безопасных объемах, не оказывающих вредного воздействия на человека.

В процессе работы экспериментальной установки, в частности роторно-пластинчатого насоса форвакуумной ступени откачной системы, выделяются пары масла. Производитель насоса при условиях обеспечения технической исправности изделия, своевременном техническом обслуживании и использовании оригинального масла гарантирует практически «безмасляный вакуум». Однако попадание масла в помещение лаборатории возможно через выхлоп насоса. Для устранения возможного загрязнения воздуха в помещении, к выхлопу насоса подключен канал для отвода паров масла в открытое пространство. В качестве дополнительной меры защиты рекомендуется установить воздушную вытяжку в помещении.

Анализ стенда позволяет сделать вывод о том, что испытательная установка является экологически безопасной.

Однако не стоит забывать о том, что при производстве любой, даже экологически безопасной продукции, окружающей среде наносится определенный вред. В 2019 г. Российская Федерация ратифицировала Парижское соглашение [7], в котором было указано, что этот вред можно измерить с помощью анализа количества углекислого газа CO_2 , выделившегося при производстве исходных компонентов для установки [8].

Углеродный след в данном случае – это совокупность всех выбросов парниковых газов, произведенных прямо и косвенно при производстве исследуемой установки. В него включены такие этапы жизненного цикла изделия, как добыча исходных ресурсов, транспортировка до места производства, процесс производства, использования и утилизации. Соответственно, вычислим так называемый углеродный след производства с помощью одной из самых распространенных моделей – модели ввода–вывода (Environmental Input – Output (EIO) [9].

Модель ввода–вывода является «нисходящим» методом, также называется методом «сверху–вниз». Методологическая основа была разработана в 1970-х гг. Является наиболее быстрой и простой для вычисления величины углеродного следа из всех существующих.

Для получения расчетов согласно данной модели необходимо использовать табличные значения интенсивности выделения углерода (измеренные в килограммах углекислого газа) для установления значения углеродного следа продукции на основе ее цены [10].

Приближенный углеродный след N для рассчитываемой установки

$$N = kZ = 50,53 \text{ т CO}_2\text{e}, \quad (12)$$

где $k = 1785,2$ тонн $\text{CO}_2\text{e}/\text{руб.}$ – коэффициент перевода согласно [11]; Z – итоговая стоимость установки.

При этом необходимо отметить, что средний углеродный след по Российской Федерации на человека в год составляет приблизительно 12 т CO_2e , а общемировые целевые показатели, которые помогут удержать изменения климата, составляют 2 т на человека в год. Можно сделать вывод о том, что к вопросам необходимости создания аналогичных установок необходимо подходить максимально ответственно не только с точки зрения эффективного расходования средств, но и с точки зрения влияния производства подобной машины на экологию.

Заключение

По графикам видно, что при падении эффективности ниже 0,2 бессмысленно увеличивать диаметр воздухозаборника для повышения расхода. Также очевидно, что расход, поступающий в двигатель, сначала сильно зависит от диаметра воздухозаборника, однако при диаметре более 0,5 м значительно большее влияние начинает оказывать диаметр входного отверстия d_0 .

Также видим, что эффективность воздухозаборника падает с увеличением диаметра. Низкая эффективность будет требовать более высокого значения удельного импульса электроракетного двигателя.

Из расчетов видна закономерность: расход в двигателе не меняется при постоянном отношении длины воздухозаборника к шагу сетки. Иначе говоря, отношение шага сетки к длине воздухозаборника является главным параметром, определяющим его эффективность.

Необходимо отметить безопасность проведения испытаний вышеописанной установки в лабораторных условиях, однако следует обратить внимание на колоссальный углеродный след от использования данного оборудования.

Список литературы

1. Longmier B. W., Cassady L. D., Ballenger M. G. et al. VX-200 magnetoplasma thruster performance results exceeding fifty-percent thruster efficiency // *Journal of Propulsion and Power*. 2011. Vol. 27. P. 915–920.
2. Stenzel R. L. Whistler wave propagation in a large magnetoplasma // *Physics of Fluids*. 1976. Vol. 19. P. 857–864.
3. Boswell R. W., Chen F. F. Helicons – the early years // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 1997. Vol. 25. P. 1229–1244.
4. Hole M. J., Simpson S. W. Performance of a vacuum arc centrifuge with a nonuniform magnetic field // *Physics of Plasmas*. 1997. Vol. 4. P. 3493–3500.
5. Chen F. F., Boswell R. W. Helicons – the past decade // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 1997. Vol. 25. P. 1245–1257.
6. Takahashi K., Charles C., Boswell R. et al. Characterization of the temperature of free electrons diffusing from a magnetically expanding current-free double layer plasma // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2010. Vol. 43. P. 162001.
7. Парижское соглашение. URL: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement> (дата обращения: 24.04.2022).
8. Abdullina L., Smirnov V., Alimova A. et al. Development of eco-friendly mechanized rotary parking lots with a flywheel energy storage device // *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 677. P. 052037.
9. Abdullina L. et al. Calculation of the carbon footprint of industrial hybrid solar – wind turbines // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Information Technologies, Automation Engineering and Digitization of Agriculture, Science*. 2021. Vol. 981. P. 032090.
10. Abdullina L., Podolskiy A., Deeva M. et al. Determining the carbon footprint of Russian residents depending on their food and movement patterns // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci*. 2021. Vol. 677 P. 052026.
11. Guidelines to DEFRA / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting. URL: <https://www.gov.uk/government/publications/2012-greenhouse-gas-conversion-factors-for-company-reporting> (дата обращения: 24.04.2022).

References

1. Longmier B.W., Cassady L.D., Ballenger M. G. et al. VX-200 magnetoplasma thruster performance results exceeding fifty-percent thruster efficiency. *Journal of Propulsion and Power*. 2011;27:915–920.
2. Stenzel R.L. Whistler wave propagation in a large magnetoplasma. *Physics of Fluids*. 1976;19:857–864.
3. Boswell R.W., Chen F.F. Helicons – the early years. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 1997;25:1229–1244.
4. Hole M.J., Simpson S.W. Performance of a vacuum arc centrifuge with a nonuniform magnetic field. *Physics of Plasmas*. 1997;4:3493–3500.
5. Chen F.F., Boswell R.W. Helicons – the past decade. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 1997;25:1245–1257.
6. Takahashi K., Charles C., Boswell R. et al. Characterization of the temperature of free electrons diffusing from a magnetically expanding current-free double layer plasma. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2010;43:162001.
7. *Parizhskoe soglashenie = The Paris Agreement*. Available at: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement> (accessed 24.04.2022). (In Russ.)
8. Abdullina L., Smirnov V., Alimova A. et al. Development of eco-friendly mechanized rotary parking lots with a flywheel energy storage device. *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*. 2021;677:052037.
9. Abdullina L. et al. Calculation of the carbon footprint of industrial hybrid solar – wind turbines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Information Technologies, Automation Engineering and Digitization of Agriculture, Science*. 2021;981:032090.
10. Abdullina L., Podolskiy A., Deeva M. et al. Determining the carbon footprint of Russian residents depending on their food and movement patterns. *IOP Conf. Ser.: Earth and Environmental Science*. 2021;677:052026.
11. *Guidelines to DEFRA / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting*. Available at: <https://www.gov.uk/government/publications/2012-greenhouse-gas-conversion-factors-for-company-reporting> (accessed 24.04.2022).

Информация об авторах / Information about the authors

Данил Дмитриевич Белов

учебный мастер,
 Московский государственный технический
 университет имени Н. Э. Баумана
 (Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)
 E-mail: belov@iu4.ru

Danil D. Belov

Training master,
 Bauman Moscow State Technical University
 (building 1, 5 2nd Bauman street, Moscow, Russia)

Валерия Викторовна Дюдина

учебный мастер,
Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)
E-mail: Dyudina@iu4.ru

Василий Викторович Сапрыкин

учебный мастер,
Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)
E-mail: aprykin @iu4.ru

Виктор Витальевич Задорожный

учебный мастер,
Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)
E-mail: Zadorozhnyy@iu4.ru

Парвиз Мироджевич Норов

учебный мастер,
Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5, стр. 1)
E-mail: Norov@iu4.ru

Valeriya V. Dyudina

Training master,
Bauman Moscow State Technical University
(building 1, 5 2nd Bauman street, Moscow, Russia)

Vasily V. Saprykin

Training master,
Bauman Moscow State Technical University
(building 1, 5 2nd Bauman street, Moscow, Russia)

Viktor V. Zadorozhnyy

Training master,
Bauman Moscow State Technical University
(building 1, 5 2nd Bauman street, Moscow, Russia)

Parviz M. Norov

Training master,
Bauman Moscow State Technical University
(building 1, 5 2nd Bauman street, Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 16.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 18.01.2022

Принята к публикации/Accepted 17.02.2022

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА В ПРИБОРОСТРОЕНИИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКЕ

TECHNOLOGICAL BASICS FOR IMPROVING RELIABILITY AND QUALITY IN INSTRUMENTATION AND RADIO ELECTRONICS

УДК 621.317

doi:10.21685/2307-4205-2022-3-11

ПРОТИВОДЕЙСТВИЕ АТАКАМ МАРШАЛКО НА СЕТИ ИСКУССТВЕННЫХ НЕЙРОНОВ ЗА СЧЕТ ВВЕДЕНИЯ ЛОЖНЫХ СВЯЗЕЙ

И. А. Крохин¹, М. Ю. Михеев²

^{1,2} Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия

¹ kr.ig.sv08@gmail.com, ² mix1959@gmail.com

Аннотация. Целью работы является добавление ПО эмулятора нейросети и маскирующей части нейрона в процесс обучения нейронной сети по стандарту ГОСТ Р52633 для систем аутентификации пользователя на предмет возможности повышения защиты личных криптографических ключей пользователя при атаке Маршалко.

Ключевые слова: эмулятор нейросети, криптографический ключ, атака Маршалко, обучение нейросети, аутентификация пользователя

Для цитирования: Крохин И. А., Михеев М. Ю. Противодействие атакам Маршалко на сети искусственных нейронов за счет введения ложных связей // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 86–94. doi:10.21685/2307-4205-2022-3-11

COUNTERING MARSHALCO'S ATTACKS ON ARTIFICIAL NEURON NETWORKS BY INTRODUCING FALSE CONNECTIONS

I.A. Krohin¹, M.Yu. Mikheev²

^{1,2} Penza State Technological University, Penza, Russia

¹ kr.ig.sv08@gmail.com, ² mix1959@gmail.com

Abstract. The aim of the work is to add the neural network emulator software and the masking part of the neuron to the neural network training process according to GOST R52633 standard for user authentication systems, for the possibility of increasing the protection of the user's personal cryptographic keys in the event of a Marshalko attack.

Keywords: neural network emulator, cryptographic key, Marshalko attack, neural network training, user authentication

For citation: Krokhin I.A., Mikheev M.Yu. Countering Marshalko's attacks on artificial neuron networks by introducing false connections. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(3):86–94. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-3-11

Из-за масштабной информатизации современного общества возникает необходимость обеспечения высоконадежной идентификации личности пользователя в информационном пространстве. Одним из наиболее перспективных направлений защиты личных данных является биометрическое распознавание пользователя [1].

Программно-аппаратное решение

Атака Маршалко строится на наблюдении большого числа выходов у незащищенных нейронов и поиска общих связей [2, 3].

Одним из возможных программно-аппаратных решений противодействия атаке Маршалко является использование ПО эмулятора нейросети. Все вычисления будут находиться в условном «Черном ящике» для атакующего систему биометрической идентификации. Соответственно, атакующий не сможет узнать весовые коэффициенты нейронов, так как они будут закрыты. Поэтому необходимо реализовать обучение нейронной сети, только в ПО эмулятора нейросети (рис. 1).

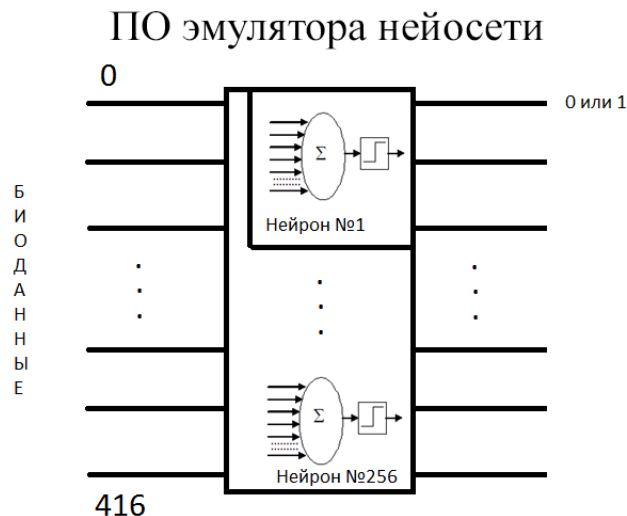


Рис. 1. Схема реализации ПО эмулятора нейросети

С использованием ПО эмулятора нейросети для атаки Маршалко необходимо изначально узнать, какие входные биометрические параметры влияют на какие входы нейронов. Для этого после имитации обучения (расчета весовых коэффициентов нейронов) использовался генератор входных биометрических параметров типа «Чужой», которые подавались на вход функции имитирующую работу нейронной сети. Функция, написанная на языке C++, представлена ниже:

```
bool* work_neuron(double input_param[NUM_BIO_PARAM] )
{
    bool result_output[NUM_NEURON];
    double res_weight = 0;
    int num_input_param = 0;
    for (int i = 0; i < NUM_NEURON; i++) // прогон по всем нейронам
    {
        for (int weight = 1; weight < NUM_INPUT_NEURON; weight++)
        // прогон по всем весам
        {
            num_input_param = Neural_network.Neuron[i].sootvetstvie[weight - 1];
            res_weight += (Neural_network.Neuron[i].weight[weight] *
            input_param[num_input_param]) - Neural_network.Neuron[i].weight[0];
        }

        if (res_weight >= Neural_network.Neuron[i].porog) // Пороговая функция
            result_output[i] = 1;
        else result_output[i] = 0;
        res_weight = 0;
    }
    return result_output;
}
```

Расчет выходного бита нейрона осуществляется с помощью пороговой функции значения вычисляемого по формуле

$$Y = \sum_{i=1}^n \mu_i X_i - \mu_0 ,$$

где μ – весовой коэффициент; X – входной биометрический параметр; n – число входов нейрона.

Для примера поиска взаимосвязи входов биометрических параметров с входами нейронов был выбран диапазон биометрических параметров от –200 до 200 с шагом 25, и вход биометрических параметров № 215.

Информация о соответствии входа биометрических параметров № 215, находящаяся в ПО эмулятора нейросети, представлена в табл. 1.

Таблица 1

Соответствие входа биометрических параметров № 215 к входам нейронов нейронной сети

Номер нейрона	Номер входа нейрона	Весовой коэффициент
13	8	0,015795
57	4	0,028119
73	10	0,033062
186	11	-0,125872

Результат выполнения программы представлен в табл. 2.

Таблица 2

Результат выполнения программы по поиску соответствий входа биометрических параметров с входами нейронов

Биометрич. параметры	-200	-175	-150	-125	-100	-75	-50	-25
№ 13	0	0	0	0	0	0	0	0
№ 57	0	0	0	0	0	0	0	0
№ 73	0	0	0	0	0	0	0	0
№ 186	1	1	1	1	1	1	1	1
	0	25	50	75	100	125	150	175
№ 13	0	0	0	1	1	1	1	1
№ 57	0	0	0	0	0	0	0	0
№ 73	0	0	0	1	1	1	1	1
№ 186	0	0	0	0	0	0	0	0

В таблице представлены выходные биты нейронов от различных биометрических параметров. Из таблицы видно, что чем больше весовой коэффициент нейрона и входной биометрический параметр, тем раньше начинает дрожать выходной бит нейрона. Так же из таблицы видно, что нейрон № 57 так и не изменил выходного бита.

С использованием ПО эмулятора нейросети для работы с нейронной сетью биометрической аутентификации, увеличивается сложность проведения атак Маршалко, так как необходимо изначально проверить каждый вход биометрических параметров на соответствие входам нейронов. А так же данная проверка не может гарантировать нахождение всех соответствий, например из-за маленьких весовых коэффициентов.

Расчет весовых коэффициентов реальных связей по ГОСТ Р 52633

Алгоритм обучения нейронной сети биометрической идентификации по ГОСТ Р 52633.5¹:

– для $j = 1, \dots, \left\lceil \frac{N_0}{n} \right\rceil$ и $i = 1, \dots, n$, где N_0 – число входов нейронной сети, n – число входов каждого из нейронов.

¹ ГОСТ Р 52633.5–2011. Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрии.

Рассчитываем весовые коэффициенты по формуле

$$\mu_i^j = \frac{(-1)^{b_j} (\overline{v_{jn+i}^1} - \overline{v_{jn+i}^0})}{a^2 \sqrt{S^2(v_{jn+i}^1)} + \sqrt{S^2(v_{jn+i}^0)}},$$

где $\overline{v_i^c}$ – выборочное среднее; $S^2(v_i^c)$ – дисперсия t -го биометрического параметра $t = 1, \dots, v_{N_0}$ для образов «Свой» ($c = 0$) и «Чужой» ($c = 1$).

Заполняем таблицу соответствий по формуле

$$d_i^j = jn + i;$$

– для $j = \left[\frac{N_0}{n} \right] + 1, \dots, N_1$ и $i = 1, \dots, n$, где N_1 – число нейронов в сети.

Рассчитываем весовые коэффициенты по формуле

$$\mu_i^j = \frac{(-1)^{b_j} (\overline{v_\tau^1} - \overline{v_\tau^0})}{a^2 \sqrt{S^2(v_\tau^1)} + \sqrt{S^2(v_\tau^0)}},$$

где τ – псевдослучайная выбранная координата вектора биометрических параметров;

– для $j = 1, \dots, N_1$. Вычисляем значение порогового элемента нейрона по формуле

$$\mu_0^j = \text{norm}(\mu_1^j, \dots, \mu_n^j).$$

По вышеописанному алгоритму была реализована программа на языке программирования C++ расчета весовых коэффициентов реальных связей:

```
int calc_weight(){
    if ((Input_bio_param.Chyzhoy == NULL) || (Input_bio_param.Svoy == NULL)) return -1;
    int num = 0;
    double mean_svoy = 0, mean_chyzhoy = 0, disp_svoy = 0, disp_chyzhoy = 0;
    // Заполняем весовые коэффициенты нейронов
    for (int j = 0; j < NUM_NEURON; j++){
        for (int i = 1; i < NUM_INPUT_NEURON; i++){
            if (j < (NUM_BIO_PARAM / NUM_INPUT_NEURON))
                // Заполняем веса для нейронов от 1 до (N0/n)
                num = (j * NUM_INPUT_NEURON) + i;
            else
                // Заполняем веса для нейронов от (N0/n + 1) до N1
                num = get_rand_range_int(1, NUM_BIO_PARAM) - 1;
            mean_chyzhoy = calc_mean(num, Input_bio_param.Chyzhoy);
            // Рассчитываем среднее значение типа "Чужой"
            mean_svoy = calc_mean(num, Input_bio_param.Svoy);
            // Рассчитываем среднее значение типа "Свой"
            disp_chyzhoy = calc_disp(num, Input_bio_param.Chyzhoy, mean_chyzhoy);
            // Рассчитываем дисперсию типа "Чужой"
            disp_svoy = calc_disp(num, Input_bio_param.Svoy, mean_svoy);
            // Рассчитываем дисперсию типа "Свой"
            if ((disp_chyzhoy == 0) && (disp_svoy == 0))
                Neural_network.Neuron[j].weight[i] = 0;
            else
                Neural_network.Neuron[j].weight[i] = (mean_chyzhoy - mean_svoy) /
                (sqrt(disp_chyzhoy) + sqrt(disp_svoy)); // Записываем вес m(ji)
            Neural_network.Neuron[j].sootvetstvie[i] = num; // Записываем соответствие d(ji)
        }
        Neural_network.Neuron[j].num = j; // Записываем порядковый номер нейрона.
    }
    // Заполняем пороговые значения нейронов
    for (int j = 0; j < NUM_NEURON; j++){
        Neural_network.Neuron[j].weight[0] = norm(Neural_network.Neuron[j].weight);
        Neural_network.Neuron[j].porog = Neural_network.Neuron[j].weight[0];
    }
    return 0;
}
```

Реализация атаки Маршалко

Атака Маршалко строится на наблюдении большого числа выходов у незащищенных нейронов и поиска общих связей [2]. Схема нахождения общих связей нейронов при обучении по ГОСТ Р52633.5 представлена на рис. 2.

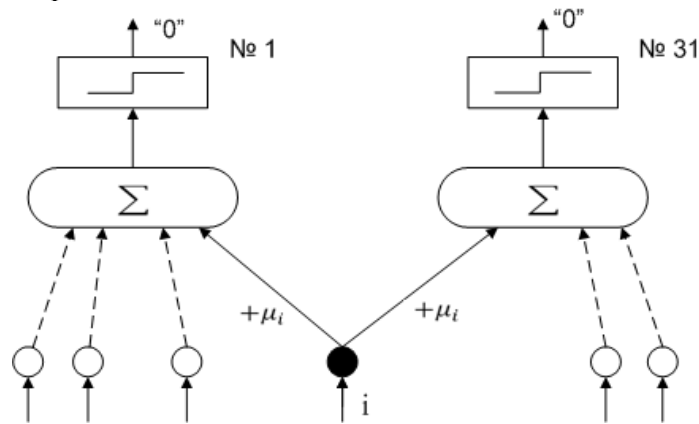


Рис. 2. Схема нахождения общих связей

Реализация атаки, т.е. поиск общих связей у нейронов, представлена на языке программирования C++:

```
int attack()
{
    int level_link = 0;
    double weight[NUM_INPUT_NEURON];
    for (int num_neuron1 = 0; num_neuron1 < NUM_NEURON - 1; num_neuron1++)
    {
        // Проверка, чтобы первый сравниваемый нейрон не состоял в группах
        if (Neural_network.Neuron[num_neuron1].attack_group == 0) {
            for (int num_neuron2 = num_neuron1 + 1; num_neuron2 < NUM_NEURON; num_neuron2++) {
                // Проверка, чтобы второй сравниваемый нейрон не состоял в группах
                if (Neural_network.Neuron[num_neuron2].attack_group != 0) break;
                // Производим сравнение двух нейронов не состоящих в группах на текущий момент
                level_link = Search_link(num_neuron1, num_neuron2, weight);
                if (level_link != 0) { //Если есть общая связь
                    Neural_network.cur_group++; // Увеличиваем индекс текущей группы
                    Write_info_link(num_neuron1, num_neuron2, level_link, weight);
                }
                // Записываем информацию о связи
                Check_group(); // Проверяем все оставшиеся нейроны на соответствие текущей группы
            }
        }
    }
    Search_free_link(); // Поиск и запись в структуру свободных нейронов
    return 0;
}
```

Алгоритм поиска общих связей заключается в сравнении по модулю весовых коэффициентов нейронов в функции Search_link. При нахождении общей связи нейронам присваивается группа, затем происходит поиск всех оставшихся нейронов, не состоящих в группах на соответствии текущей группе нейронов с общими связями, функцией Check_group. Результат работы программы по поиску общих связей у 256 линейных нейронов с 16 входами представлен на рис. 3.

Исходя из результата, можно сделать вывод:

- свободные нейроны без общих связей отсутствуют;
- все нейроны находятся в первой группе;
- общие связи между нейронами распределены в следующем порядке: 188 по одному входу (одинарная связь), 56 по два входа (двойная связь), 7 по три входа, 3 по четыре входа и 1 связь имеет 5 входов нейронов одновременно.

```

Group 0: All link 0
0 link - 0
1 link - 0
2 link - 0
3 link - 0
4 link - 0
5 link - 0
6 link - 0
7 link - 0
8 link - 0
9 link - 0
10 link - 0
11 link - 0
12 link - 0
13 link - 0
14 link - 0
15 link - 0

Group 1: All link 255
0 link - 0
1 link - 188
2 link - 56
3 link - 7
4 link - 3
5 link - 1
6 link - 0
7 link - 0

```

Рис. 3. Результат выполнения программы поиска общих связей

В табл. 3 представлены весовые коэффициенты двух случайных нейронов.

Таблица 3

Весовые коэффициенты двух случайных нейронов

Номер нейрона	1	2	3	4	5	6	7	8
39	0,17732	0,01595	0,11111	0,01381	0,06010	0,04882	0,03137	0,03749
44	0,13645	0,03604	0,03837	0,03885	0,01462	0,03341	0,02529	0,03749
	9	10	11	12	13	14	15	16
39	0,01490	0,02484	0,03365	0,07057	0,03012	0,03341	0,02534	0,02555
44	0,07456	0,02160	0,00300	0,04203	0,01645	0,03182	0,03530	0,02512

Как видно из таблицы, у нейронов общая связь по двум входам, т.е. двойная общая связь.

Противодействие изучению связей нейронной сети маскированием весовых коэффициентов

Одним из возможных программных решений противодействия атаке Маршалко является выполнение итерационного дообучения нейронной сети биометрической идентификации с целью маскирования значимых весовых коэффициентов [3]. Необходимо увеличить количество весовых коэффициентов нейрона в два раза, условно до 32, тогда атакующий не сможет точно идентифицировать общие связи значимых нейронов. Схема нейрона с использованием маскирующей части представлена на рис. 4.

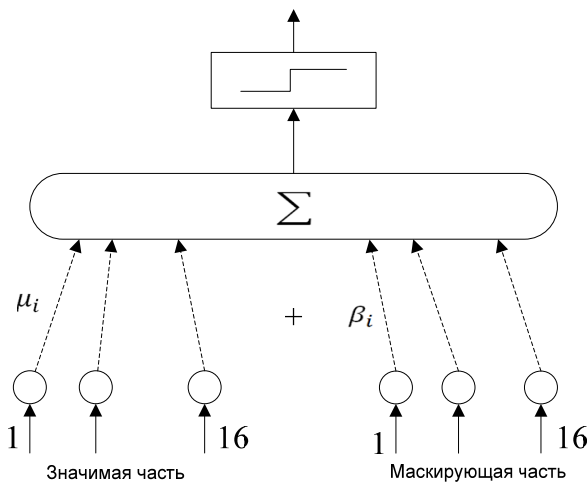


Рис. 4. Схема нейрона с использованием маскирующей части

Добавление маскирующих весовых коэффициентов реализовано на языке программирования

```

C++:
int add_mask_elements()
{
    int Neuron1_ID = 0, Neuron2_ID = 0;
    double weight = 0;
    for (int group_id = 1; group_id < Neural_network.cur_group + 1; group_id++) {
        // Анализируем все заполненные группы
        for (int link_id = 0; link_id < Neural_network.group[group_id].sum_link; link_id++){
            // Анализируем все общие связи в группе
            for (int level_id = 0; level_id < Neural_network.group[group_id].link[link_id].
                level_link; level_id++) {
                // Анализируем все уровни
                Neuron1_ID = Neural_network.group[group_id].link[link_id].neuron1;
                Neuron2_ID = Neural_network.group[group_id].link[link_id].neuron2;
                weight = Neural_network.group[group_id].link[link_id].weight[level_id];

                for (int in_neuron_id = 0; in_neuron_id < NUM_INPUT_NEURON; in_neuron_id ++ ) {
                    // Проверка первого нейрона, на наличие такого веса в маске
                    if (fabs(Neural_network.Neuron[Neuron1_ID].mask_weight[in_neuron_id]) ==
                        fabs(weight)) break; // Сравниваем веса по модулю
                    else if ((in_neuron_id == NUM_INPUT_NEURON - 1) && (Neural_network.
                        Neuron[Neuron1_ID].cur_mask_weight < NUM_INPUT_NEURON)) {
                        Neural_network.Neuron[Neuron1_ID].mask_weight[Neural_network.Neuron[Neuron1_ID].
                            cur_mask_weight] = weight * (-1); // Добавляем вес в маску с обратным знаком
                        Neural_network.Neuron[Neuron1_ID].cur_mask_weight++;
                    }
                }
                for (int in_neuron_id = 0; in_neuron_id < NUM_INPUT_NEURON; in_neuron_id++) {
                    // Проверка второго нейрона, на наличие такого веса в маске
                    if (fabs(Neural_network.Neuron[Neuron2_ID].mask_weight[in_neuron_id]) ==
                        fabs(weight)) break; // Сравниваем веса по модулю
                    else if ((in_neuron_id == NUM_INPUT_NEURON - 1) && (Neu-
                        ral_network.Neuron[Neuron2_ID].cur_mask_weight < NUM_INPUT_NEURON)) {
                        Neural_network.Neuron[Neuron2_ID].mask_weight[Neural_network.Neuron[Neuron2_ID].
                            cur_mask_weight] = weight * (-1); // Добавляем вес в маску с обратным знаком
                        Neural_network.Neuron[Neuron2_ID].cur_mask_weight++;
                    }
                }
            }
        }
    }
    return 0;
}
    
```

Алгоритм маскирования заключается в добавлении весового коэффициента в маскирующую часть нейрона с обратным знаком при обнаружении общей связи между нейронами.

В табл. 4 представлен пример заполнения маскирующими весовыми коэффициентами 39 и 44 нейронов.

Таблица 4

Маскирующие весовые коэффициенты

Номер нейрона	1	2	3	4	5	6	7	8
39	-0,02534	-0,03749	-0,03341	-0,01595	-0,01490			
44	-0,03749	-0,03341						
	9	10	11	12	13	14	15	16
39								
44								

Затем необходимо заполнить оставшиеся маскирующие входы нейронов. Также нужно не ухудшить качество биометрической идентификации пользователей, для этого весовые коэффициенты маскирующей части нейрона в сумме должны равняться нулю.

Генерация оставшихся весовых коэффициентов маскирующей части нейрона представлена ниже:

```
void generate_free_mask_weight()
{
    double need_sum = 0; // необходимая сумма генерируемых весов
    int num_weight = 0; // число генерируемых весов
    for (int num_neuron = 0; num_neuron < NUM_NEURON; num_neuron++) {
        num_weight = NUM_INPUT_NEURON - Neural_network.Neuron[num_neuron].cur_mask_weight;
        need_sum = 0;
        for (int num_weight_id = 0; num_weight_id < Neural_network.Neuron[num_neuron].cur_mask_weight; num_weight_id++){
            need_sum += Neural_network.Neuron[num_neuron].mask_weight[num_weight_id];
        }
        // Подсчитываем сумму текущих весов
        need_sum *= (-1); // меняем знак, чтобы итоговая сумма равнялась 0
        generate_weight(num_neuron, num_weight, need_sum);
    }
}
```

Функция `generate_weight` является генератором псевдослучайных величин в диапазоне $-0,3$ до $0,3$. Последний весовой коэффициент маскирующей части нейрона является регулирующим, чтобы выполнялось условие $\sum_{i=1}^{16} \beta_i * X \approx 0$.

В табл. 5 представлены маскирующие весовые коэффициенты нейронов 39 и 44, после выполнения программы по генерации оставшихся весов маскирующей части.

Таблица 5

Маскирующая часть весовых коэффициентов нейронов

Номер нейрона	1	2	3	4	5	6	7	8
39	-0,02534	-0,03749	-0,03341	-0,01595	-0,01490	-0,2243	-0,2491	0,1995
44	-0,03749	-0,03341	0,163	-0,2198	-0,2764	0,2538	0,1341	-0,2478
	9	10	11	12	13	14	15	16
39	0,2068	-0,1859	-0,1138	0,177	-0,2377	0,2609	-0,0319	0,3256
44	0,2607	0,1479	-0,0568	-0,2021	-0,0374	0,1489	-0,2796	0,2824

Сумма маскирующей части у обоих нейронов равняется 0, что не ухудшает качества работы нейронной сети биометрической идентификации.

Благодаря дообучению нейронной сети биометрической идентификации с целью маскирования значимых весовых коэффициентов возможно противодействовать атакам Маршалко, так как увеличивается сложность поиска значимых общих связей нейронов из-за наличия маскирующей части нейрона, задача которой запутывать атакующего.

Список литературы

1. Ахметов Б. Б., Иванов А. И., Фунтиков В. А. [и др.]. Технология использования больших нейронных сетей для преобразования нечетких биометрических данных в код ключа доступа. Алматы : LEM, 2014. 144 с.
2. Marshalko G. V. On the security of a neural network-based biometric authentication scheme // Математические вопросы криптографии. 2014. Т. 5. С. 87–98.
3. Крохин И. А. Противодействие атакам Маршалко итерационным дообучением нейронов как способ повышения стойкости биометрической защиты личных криптографических ключей // Безопасность информационных технологий : сб. науч. ст. по материалам II Всерос. науч.-техн. конф. Пенза : Изд-во ПГУ, 2020. С. 61–66.

References

1. Akhmetov B.B., Ivanov A.I., Funtikov V.A. et al. *Tekhnologiya ispol'zovaniya bol'shikh neyronnykh setey dlya preobrazovaniya nechetkikh biometricheskikh dannyykh v kod klyucha dostupa = Technology of using large neural networks to convert fuzzy biometric data into an access key code*. Almaty: LEM, 2014:144. (In Russ.)

2. Marshalko G.B. On the security of a neural network-based biometric authentication scheme. *Matematicheskie voprosy kriptografii = Mathematical issues of cryptography*. 2014;5:87–98.
3. Krokhin I.A. Countering Marshalko attacks by iterative training of neurons as a way to increase the durability of biometric protection of personal cryptographic keys. *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy: sb. nauch. st. po materialam II Vseros. nauch.-tekhn. konf = Information technology security : collection of scientific articles based on the materials of the II All-Russian scientific and technical conf*. Penza: Izd-vo PGU, 2020:61–66. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Игорь Алексеевич Крохин

аспирант,
Пензенский государственный технологический
университет
(Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: kr.ig.sv08@gmail.com

Igor' A. Krokhin

Postgraduate student,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukov passage/Gagarin street,
Penza, Russia)

Михаил Юрьевич Михеев

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информационных
технологий и систем,
Пензенский государственный технологический
университет
(Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: mix1959@gmail.com

Mikhail Yu. Mikheev

Doctor of technical sciences, professor,
head of the sub-department of informational
technologies and systems,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukov passage/Gagarin street,
Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 21.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 20.01.2022

Принята к публикации/Accepted 21.02.2022

МУЛЬТИСЕНСОРНЫЙ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ БИНАРНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

В. М. Гречишников¹, А. Е. Капитуров², К. Б. Нерсисян³, О. В. Теряева⁴

^{1,2,3,4} Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева, Самара, Россия
¹gv@ssau.ru, ²andrew_bee@mail.ru, ³nersisyan-k@list.ru, ⁴arefeva_olga@inbox.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Рассмотрена конструкция и принцип действия мультисенсорного волоконно-оптического преобразователя бинарных механических сигналов на основе волоконно-оптического цифроаналогового преобразователя (ЦАП) последовательного типа. *Материалы и методы.* Описан способ линеаризации функции преобразования устройства, его математическая и имитационная модели. *Результаты и выводы.* Обосновываются преимущества предложенного устройства по сравнению с аналогом на основе параллельного ЦАП.

Ключевые слова: волоконно-оптический цифроаналоговый преобразователь, математическая модель, имитационная модель, логарифмический усилитель, аналого-цифровой преобразователь

Для цитирования: Гречишников В. М., Капитуров А. Е., Нерсисян К. Б., Теряева О. В. Мультисенсорный волоконно-оптический преобразователь бинарных механических сигналов // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 95–103. doi:10.21685/2307-4205-2022-3-12

MULTI-SENSOR FIBER-OPTIC CONVERTER OF BINARY MECHANICAL SIGNALS

V.M. Grechishnikov¹, A.E. Kapiturov², K.B. Nersisyan³, O.V. Teryaeva⁴

^{1,2,3,4} Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia
¹gv@ssau.ru, ²andrew_bee@mail.ru, ³nersisyan-k@list.ru, ⁴arefeva_olga@inbox.ru

Abstract. *Background.* The design and principle of operation of a multi-sensor fiber-optic converter of binary mechanical signals based on a fiber-optic digital-to-analog converter (DAC) of a serial type is considered. *Materials and methods.* The method of linearization of the device transformation function, its mathematical and simulation models are described. *Results and conclusions.* The advantages of the proposed device in comparison with an analog based on a parallel DAC are substantiated.

Keywords: fiber-optic digital-to-analog converter, mathematical model, simulation model, logarithmic amplifier, analog-to-digital converter

For citation: Grechishnikov V.M., Kapiturov A.E., Nersisyan K.B., Teryaeva O.V. Multi-sensor fiber-optic converter of binary mechanical signals. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(3):95–103. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-3-12

Введение

Мультисенсорные волоконно-оптические преобразователи информации находят все более широкое применение в системах управления сложным технологическим оборудованием [1, 2], а также мониторинга пространственно распределенных объектов промышленной [2], транспортной и социальной инфраструктуры [3]. К настоящему времени разработаны мультисенсорные преобразователи давления, температуры, механических деформаций, влажности и других физических параметров, способных надежно функционировать в экстремальных условиях эксплуатации [4]. Наиболее распространенной конструктивно-технологической платформой для создания пространственно распределенной волоконно-оптической мультисенсорной измерительной структуры являются одномодовые световоды с последовательно расположенными в них внутриволоконными решетками Брэгга [5]. К недостаткам таких преобразователей следует отнести сложность аппаратуры формирования и обработки сигналов, высокую удельную стоимость сенсорного канала, недостаточную

устойчивость сенсоров к бинарным силовым воздействиям и невысокую надежность, свойственную техническим устройствам с последовательным соединением функциональных элементов.

В связи с этим в работах [6–8] предложен и теоретически обоснован новый класс мультисенсорных преобразователей бинарных механических сигналов (МПБС) в электрические с дистанционным разнесением чувствительных элементов и электронного блока с помощью волоконно-оптической линии связи (ВОЛС). Основным системообразующим элементом в них является волоконно-оптический цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) с суммированием весовых коэффициентов, состоящий из набора оптических аттенуаторов и волоконно-оптического сумматора. Входные бинарные механические сигналы в них с помощью оптико-механических переключателей преобразуются в логические оптические сигналы, которые с помощью ЦАП преобразуются в аналоговый квантованный сигнал. Полученный сигнал передается по волоконно-оптической линии связи в электронный блок, в котором производится фотоэлектрическое преобразование и восстановление входных сигналов МПБС в виде электрического кода.

Недостатком МПБС на основе параллельных ЦАП является необходимость прокладки отдельного световода к каждой точке контролируемого пространства, что усложняет конструкцию и приводит к значительным материальным затратам.

В связи с этим представляется актуальной разработка и исследование новых структурно-алгоритмических решений преобразователей на основе волоконно-оптических ЦАП с последовательной структурной схемой.

Такие конструкции позволяют повысить технико-экономическую эффективность МПБС за счет возможности подключения к общей волоконно-оптической шине необходимого набора чувствительных элементов. Особенностью таких преобразователей является нелинейность функции преобразования, что требует применения нестандартизированных аналого-цифровых преобразователей с нелинейной функцией преобразования. Поэтому разработка и теоретическое обоснование конструкции МПБС, основанной на новом способе линеаризации функции преобразования, обеспечивающей возможность использования в электронном блоке линейных аналого-цифровых преобразователей, является актуальной задачей.

Конструкция и математическая модель мультисенсорного волоконно-оптического преобразователя информации

Структурная схема мультисенсорного волоконно-оптического преобразователя информации представлена на рис. 1.

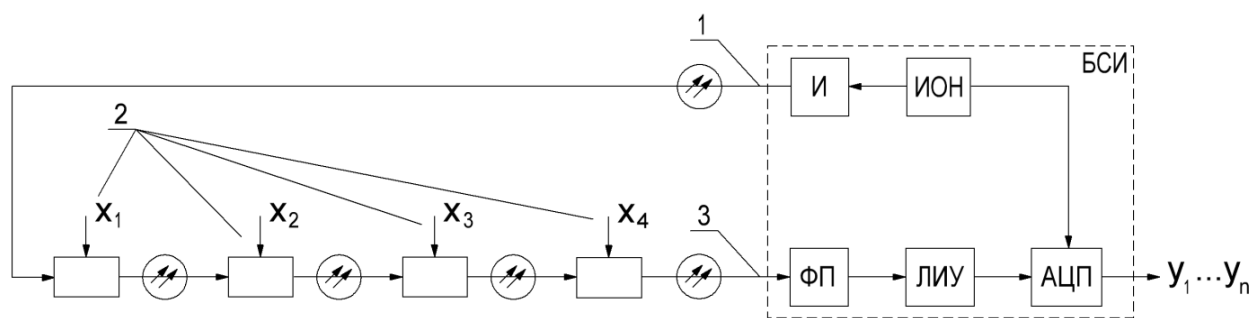


Рис. 1. Структурная схема мультисенсорного волоконно-оптического преобразователя информации: АЦП – аналого-цифровой преобразователь; БСИ – блок сбора информации; И – излучатель; ИОН – источник опорного напряжения; ЛИУ – логарифмирующий интегрирующий усилитель; ФП – фотоприемник

Устройство предназначено для однозначного дистанционного преобразования входного бинарного механического кода x_1, x_2, \dots, x_m в электрический код y_1, y_2, \dots, y_m . Отличием рассматриваемого устройства от известных [9] является использование в нем волоконно-оптического ЦАП с последовательной структурой. ЦАП состоит из последовательно соединенных к волоконно-оптической линии связи оптических аттенуаторов 2, одновременно выполняющих функции переключения оптических сигналов. В качестве примера, без ущерба для общности рассуждений, в статье рассмотрен четырехразрядный ЦАП. Данное устройство работает следующим образом. Напряжение с первого выхода источника опорного напряжения ИОН задает ток накачки излучателя И и, соответственно, уровень оптической мощности на его выходе. Направленное оптическое излучение с выхода излучателя с помощью передающего моноволоконного световода 1 подводится к группе

оптических переключателей со встроенными аттенюаторами 2, которые в нажатом состоянии осуществляют деление оптической мощности излучения в соответствии с выражением

$$K_n = \frac{1}{2^{n-1}}, \quad (1)$$

где n – порядковый номер переключателя.

При разомкнутом оптическом переключателе оптическое излучение передается без ослабления ($K = 1$). Таким образом, оптическое излучение, проходя через последовательно соединенные аттенюаторы, получает свои весовые коэффициенты в соответствии с выражением (1). Взвешенный таким образом световой поток по оптическому моноволоконному кабелю 3 поступает на вход фотоприемника ФП. При этом мощность оптического сигнала на фотоприемнике будет определяться выражением

$$P_{\text{вх}} = K_1 K_2 K_3 K_4 P_{\text{изл}}. \quad (2)$$

В фотоприемнике оптическое излучение преобразуется в пропорциональный ему электрический сигнал (рис. 2) и поступает на логарифмический инвертирующий усилитель ЛИУ. Сигнал на выходе фотоприемника описывается выражением

$$U_{\text{ФП}} = S_{\text{ФП}} P_{\text{вх}} = S_{\text{ФП}} P_{\text{изл}} \prod_{i=1}^4 K_i, \quad (3)$$

где $S_{\text{ФП}}$ – вольтовая чувствительность фотоприемника, $[S_{\text{ФП}}] = \frac{\text{В}}{\text{Вт}}$.

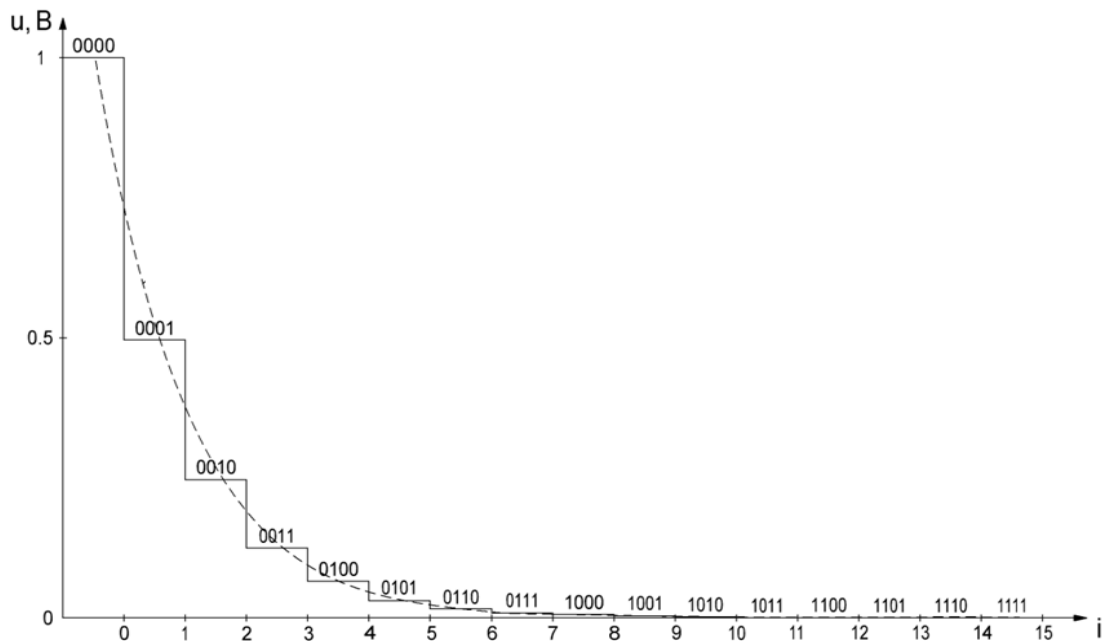


Рис. 2. График сигнала на выходе фотоприемника

Характер нелинейной зависимости на рис. 2 свидетельствует о возрастании энергетических потерь в оптической схеме при увеличении числа разрядов входного кода, что, с одной стороны, ограничивает информационную емкость устройства на уровне 3–4 бит, а с другой – требует применения нелинейного аналого-цифрового преобразователя в блоке электронной обработки сигнала. В связи с этим рассмотрим способ линейаризации функции преобразования устройства, основанный на логарифмировании сигнала фотоприемника.

Сигнал на выходе логарифмического усилителя будет описываться выражением

$$U_{\text{вых}} = A \log_2 \left(S_{\text{ФП}} P_{\text{изл}} \prod_{i=1}^4 K_i \right) = A \left[\log_2 (S_{\text{ФП}} P_{\text{изл}}) + \sum_{i=1}^4 \log_2 K_i \right]. \quad (4)$$

Учитывая выражение (1), а также то, что максимальное значение напряжения равно $S_{\text{ФП}} P_{\text{ИЗЛ}} = U_{\text{МАХ}}$, выражение (4) можно переписать в виде

$$U_{\text{ВЫХ}} = A \left(\log_2 U_{\text{МАХ}} - \sum_{n=1}^4 x_n 2^{n-1} \right), \quad (5)$$

где $x_n = \overline{0,1}$ – значения разрядных цифр входного кода, параметр усилителя, $[A] = B$.

Из выражения (4) видно, что сигнал на выходе логарифмического усилителя представляет собой линейную функцию входного кода x_1, x_2, \dots, x_m , что делает возможным восстановление входного механического кода в электрической форме за счет линейного аналого-цифрового преобразования сигнала с выхода логарифмического усилителя.

Далее на вход АЦП поступает сигнал, пропорциональный установившемуся значению выходного сигнала инвертирующего усилителя. При использовании интегрального АЦП параллельного преобразования (рис. 3) процесс аналого-цифрового преобразования можно представить в виде последовательности следующих операций [9].

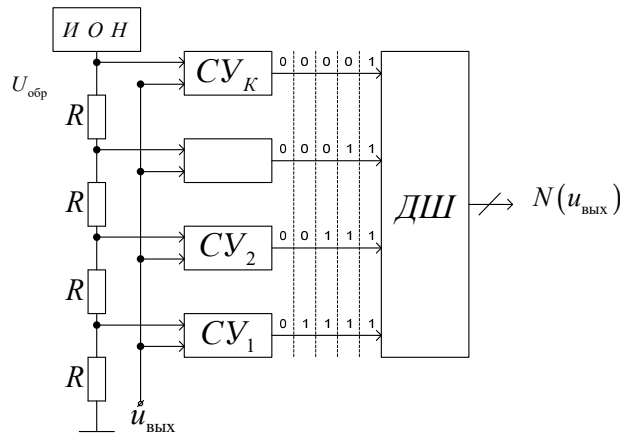


Рис. 3. Функциональная схема АЦП параллельного преобразования

В начале с помощью компараторов $CU_1 - CU_K$ формируется единичный код $e = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$, где $e_i = \overline{0,1}$. Математическую модель работы компараторов представим в виде

$$e_i = \begin{cases} 1, & u_{\text{ВЫХ}}(x_1, x_2, \dots, x_k) \geq u_{\text{пор}i}, \\ 0, & u_{\text{ВЫХ}}(x_1, x_2, \dots, x_k) < u_{\text{пор}i}, \end{cases} \quad (6)$$

где $u_{\text{пор}i} = \frac{u_{\text{обp}}}{m} i$; i – порядковый номер компаратора; m – общее число компараторов; $u_{\text{обp}}$ – напряжение источника опорного сигнала.

Затем преобразуем единичный код в единичный позиционный в соответствии с выражением

$$\begin{cases} b_i = e_i \overline{e_{i+1}}, & i = 1 \dots (m-1), \\ b_m = e_m \overline{e_0}. \end{cases} \quad (7)$$

В результате обработки в дешифраторе логических сигналов $b_1 \dots b_m$ в соответствии с выражением

$$a_i(x) = \bigcap_{t=2^i(2k+1)}^{\overline{2^{i+1}(k+1)-1}} b_t(x), \quad k = 0 \dots (2^{n-1-i} - 1), \quad i = \overline{0, n-1} \quad (8)$$

на выходе АЦП формируется двоичный электрический код, значения разрядных цифр которого y_1, y_2, \dots, y_m однозначно определяются положениями оптических переключателей x_1, x_2, \dots, x_m .

Совокупность математических выражений представляет собой математическую модель рассматриваемого устройства.

Конструкция оптического переключателя с регулируемым аттенуатором

Одним из важнейших элементов рассматриваемого преобразователя являются регулируемые оптические аттенуаторы, в которых осуществляется функция назначения весового коэффициента и переключения оптических сигналов. Принцип совмещения в нем функций регулируемого аттенуатора и переключателя оптических сигналов иллюстрируется на рис. 4 [10].

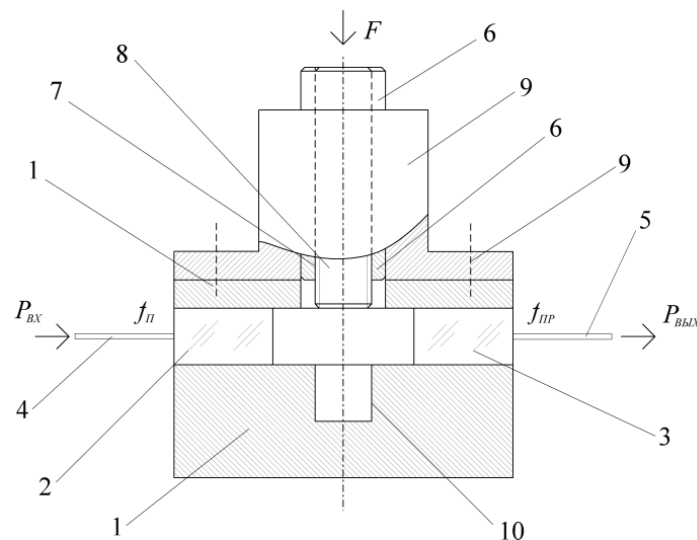


Рис. 4. Конструкция оптического переключателя с регулируемым аттенуатором:

- 1 – корпус; 2 – передающая градиентная цилиндрическая линза; 3 – приемная градиентная цилиндрическая линза; 4 – передающий моноволоконный световод; 5 – приемный моноволоконный световод; 6 – круглый подвижный шток; 7 – резьбовое отверстие; 8 – резьбовой стержень; 9 – двухпозиционное устройство фиксации штока в крайних положениях; 10 – глухое цилиндрическое отверстие

Данный оптический переключатель работает следующим образом. Входной оптический сигнал с помощью световода 4 подается в фокус градиентной линзы 2. На выходе этой линзы формируется коллимированный световой поток, который распространяется по воздушному зазору и попадает на входной торец линзы 3. Использование в конструкции аттенуатора градиентных линз обусловлено слабой зависимостью вносимых энергопотерь η_R от зазора, которые определяются выражением [11]

$$\eta_R = -10 \cdot \lg \left(\frac{r}{r + \Theta \cdot R} \right)^2, \quad (9)$$

где r – радиус линзы (1,5...2 мм); Θ – угол расходимости излучения (5...10 мрад); R – зазор между линзами.

Из приведенного выражения видно, что даже при достаточно большом зазоре между линзами 10 мм потери не превышают 0,56 Дб.

После воздействия на шток силы F с помощью фиксатора 9 шток 6 фиксируется в крайнем нижнем положении. При этом нижняя часть резьбового стержня 8 входит в воздушный зазор между линзами 2 и 3. Это приводит к экранировке светового потока на входе линзы 3. В этом случае светопропускание будет определяться положением нижнего торца резьбового стержня 8 в воздушном зазоре между градиентными линзами 2 и 3. Путем вращения стержня 8 можно регулировать его вертикальное положение в зазоре между линзами и за счет этого устанавливать необходимый коэффициент ослабления оптического сигнала в диапазоне от 0 до 1. При повторном воздействии силы на шток 6 фиксируется в крайнем верхнем положении, при этом резьбовой стержень 8 полностью выходит из зазора между линзами 2 и 3. Глухое отверстие 10 в корпусе 1 предотвращает заклинивание штока 6 при чрезмерно выдвинутом резьбовом стержне 8. Путем циклического механи-

ческого воздействия на верхний торец штока можно также сформировать последовательность импульсных оптических сигналов заданной амплитуды.

Результаты моделирования работы мультисенсорного преобразователя информации

Для проверки работоспособности предлагаемого преобразователя, собранного на реальной элементной базе, было проведено моделирование структурной схемы преобразователя, изображенной на рис. 1, в пакете программ MicroCap 12 [12]. Достоинствами MicroCap 12 является высокая точность математических моделей реальных электронных компонентов.

В процессе моделирования схема мультисенсорного волоконно-оптического устройства сбора информации для большей точности и простоты была разбита на несколько частей. На рис. 5 представлена электрическая схема логарифматора и инвертирующего усилителя в пакете программ MicroCap 12.

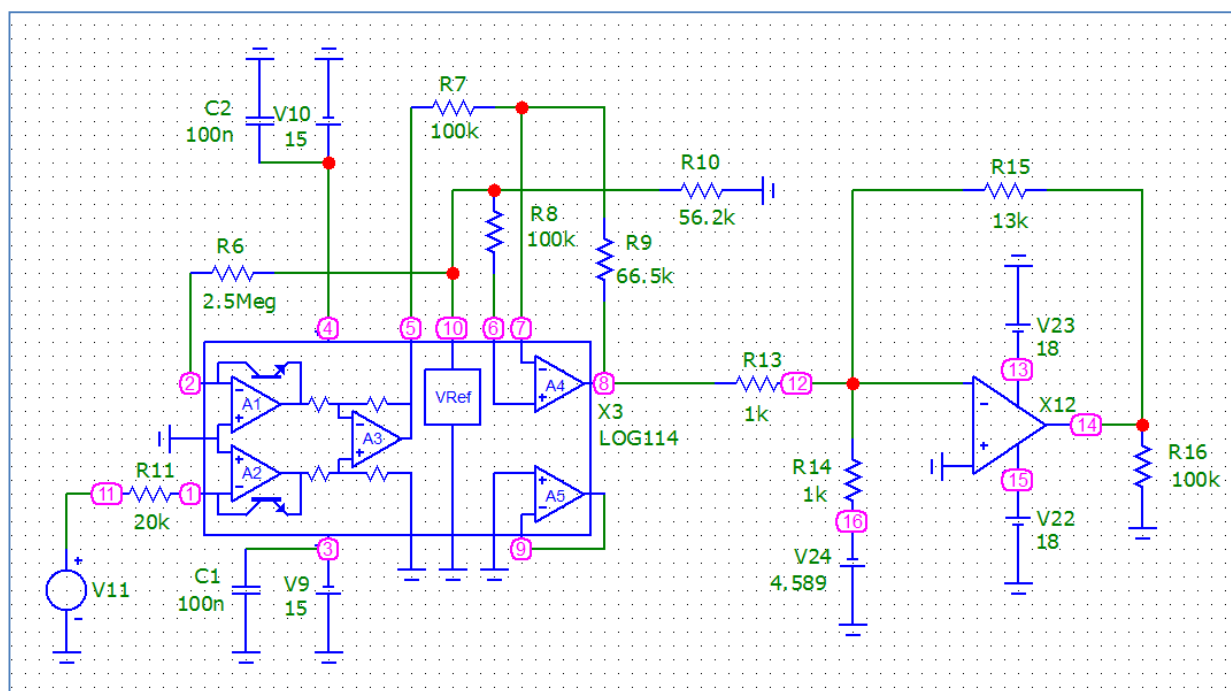


Рис. 5. Электрическая схема логарифматора и инвертирующего усилителя в пакете программ MicroCap 12

Блок логарифмирующего инвертирующего усилителя ЛИУ (рис. 1) был разбит на два отдельных блока: логарифматор и инвертирующий усилитель (ИУ). В качестве логарифматора было рассмотрено множество вариантов [13], в итоге выбор остановился на планарной микросхеме LOG114 [14] фирмы Burr-Brown от TexasInstruments. Данная микросхема обеспечивает требуемую линейность вольтамперной характеристики (ВАХ) при максимальном токе 50 мкА и, как следствие, ровный ступенчатый сигнал на выходе. Результаты имитационного моделирования приведены на рис. 6.

На вход логарифматора поступает сигнал, вид которого представлен на рис. 6,а. Каскад на операционном усилителе, выполненный на микросхеме TL071 [15] (рис. 5, компонент X12), является сумматором и инвертирующим усилителем. Источник напряжения V24 служит для задания нулевого уровня на выходе логарифматора. ИУ усиливает сигнал логарифматора в 13 раз и придает ему форму восходящей ступеньки (рис. 6,б). Нагрузочное сопротивление R16 номиналом 100 кОм имитирует входное сопротивление АЦП. При этом ИУ требуется отдельное двухполярное питание величиной ± 18 В, т.е. максимально допустимое напряжение питания. Для исключения неоднозначности преобразования в АЦП максимальное отклонение выходного сигнала ЛИУ от значения шага 1 В составляет около 0,14 В при допустимом 0,25 В [8].

В качестве АЦП было также рассмотрено множество вариантов готовых АЦП на одной микросхеме от фирм TexasInstruments и AnalogDevices, но не все они имеют высокий вход (более 6 В), параллельный выход на 4 разряда или более с сохранением точности. К тому же стоимость одной микросхемы с доставкой составляет более 100\$, поэтому было принято решение разработать в среде MicroCap 12 параллельный АЦП в соответствии с рис. 4.

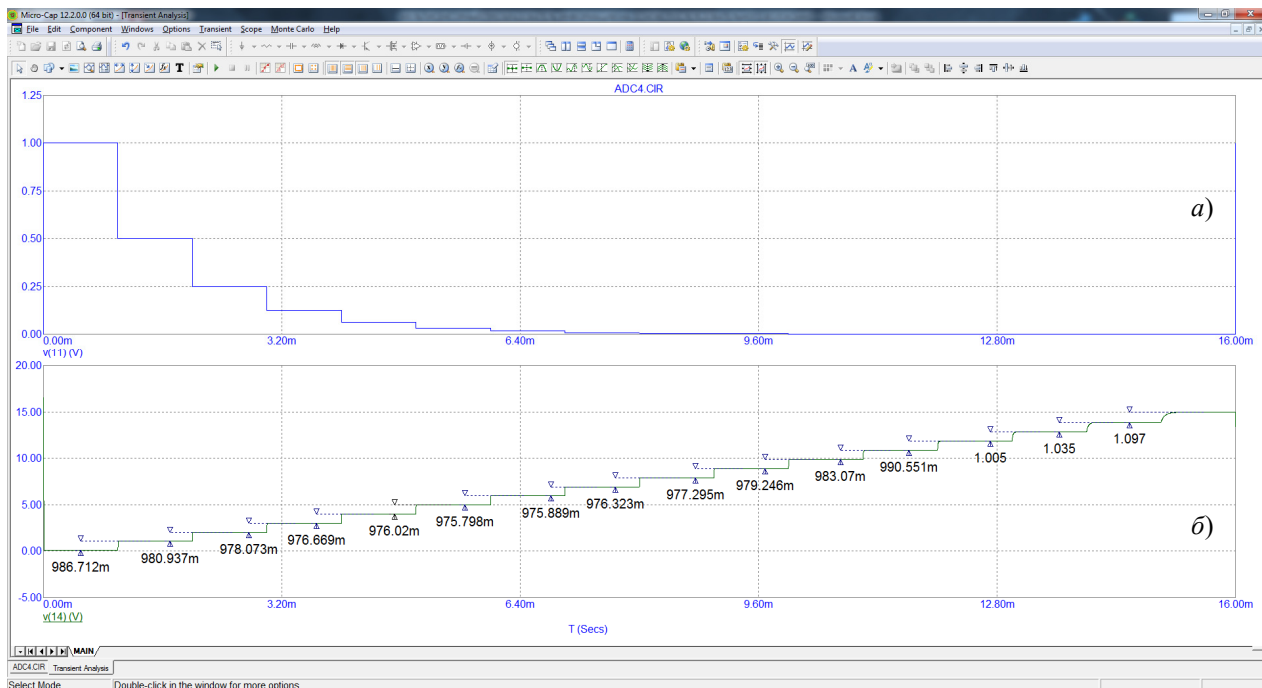


Рис. 6. Графики сигналов логарифматора и инвертирующего усилителя в пакете программ MicroCap 12:
a – входной сигнал логарифматора; *б* – выходной сигнал инвертирующего усилителя

В качестве источника опорного напряжения (ИОН) используется источник напряжения V1 номиналом 16 В, которое через делители напряжения подается на инвертирующие входы компараторов, выполненных на восьми микросхемах NE4558 [16], сдвоенных ОУ, работающих также и при однополярном напряжении питания. Входной сигнал (эквивалентный выходной сигнал ЛИУ) поступает на неинвертирующие входы компараторов (в соответствии с рис. 4). Выходной сигнал каждого компаратора через делитель для задания необходимого уровня напряжения при ТТЛ (2,4-2,7 В) поступает на вход одного из двух дешифраторов на микросхемах 74F148 [17]. Далее через логические вентили сигналы с выходов дешифраторов поступают на входы четырех *D*-триггеров, выполненных на двух сдвоенных микросхемах 74ALS74A [18], на выходах которых образуются сигналы логических «0» или «1».

Заключение

Полученные результаты разработки функциональной схемы, ее математического и имитационного моделирования нового метода линеаризации функции преобразования подтвердили возможность создания реального четырехразрядного мультисенсорного волоконно-оптического устройства сбора информации на основе волоконно-оптического цифроаналогового преобразователя с последовательной структурной схемой с использованием современной элементной базы. Установлена сильная зависимость энергетических потерь от количества разрядов преобразователя. Поэтому полученные результаты определяют целесообразность использования разработанных МПБС в качестве малоразрядных (3–4 бита) цифроаналоговых волоконно-оптических секций при создании секционированных многоразрядных преобразователей на основе комбинированной параллельно-последовательной структуры [7].

Список литературы

1. Гармаш В. Б. Возможности, задачи и перспективы волоконно-оптических измерительных систем в современном приборостроении // Фотон-экспресс. 2005. № 6. С. 128–140.
2. Волоконные датчики: перспективы промышленного применения. URL: <http://www.russianelectronics.ru/developer-r/review/2193/doc/54040/>
3. Шишкин В. В., Чурин А. Е., Харенко Д. С., Шелемба И. С. Система мониторинга несущих конструкций футбольного манежа на основе волоконно-оптических датчиков // Фотон-экспресс. 2013. № 6. С. 22–23.
4. Hogan H. With fiber comes miles-long and multiplexed sensors // Photonics Spectra. 2015.

5. Yao J. P. Microwave photonics for high-resolution and high-speed interrogation of fiber Bragg grating sensors // *Fiber and Integrated Optics*. 2015. P. 230–242.
6. Теряева О. В. Мультисенсорные преобразователи информации на основе волоконно-оптических ЦАП : дис. ... канд. техн. наук. Самара, 2017. 164 с.
7. Гречишников В. М., Комаров Е. Г. Повышение информационной емкости волоконно-оптического мультисенсорного преобразователя бинарных механических сигналов в электрические // *Измерительная техника*. 2020. № 9. С. 15–23.
8. Зеленский В. А., Гречишников В. М. Бинарные волоконно-оптические преобразователи в системах управления и контроля. Самара : Самарский научный центр РАН, 2006. 120 с.
9. Гречишников В. М., Теряева О. В. Метрология и радиоизмерения. Самара : Изд-во Самарского научного центра РАН, 2018. 166 с.
10. Патент 2768522 Российская Федерация. Регулируемый оптический аттенуатор / Гречишников В. М., Капитуров А. Е. ; заявитель и патентообладатель Самар. нац. исслед. ун-т им. С. П. Королева ; № 2021106244 ; заявл. 10.03.2021 ; опублик. 24.03.2022.
11. Гречишников В. М. Схемотехника волоконно-оптических устройств. Самара : Изд-во Самар. ун-та, 2018. 172 с.
12. MicroCap 12. URL: <http://www.spectrum-soft.com/index.shtml>
13. Микросхемы логарифмических усилителей традиционной схемотехники. URL: <https://kit-e.ru/usil/mikroshemy-logarifmicheskikh-usilitelej-tradiczionnoj-shemotehniki-2/>
14. LOG114. URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/180720/BURR-BROWN/LOG114.html>
15. TL071. URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/5779/MOTOROLA/TL071.html>
16. NE4558. URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/17944/PHILIPS/NE4558.html>
17. 74F148. URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/50289/FAIRCHILD/74F148.html>
18. 74ALS74A. URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/15268/PHILIPS/74ALS74A.html>

References

1. Garmash V.B. Possibilities, tasks and prospects of fiber-optic measuring systems in modern instrumentation. *Foton-ekspress = Photon-express*. 2005;(6):128–140. (In Russ.)
2. *Volokonnyye datchiki: perspektivy promyshlennogo primeneniya = Fiber sensors: prospects for industrial application*. (In Russ.). Available at: <http://www.russianelectronics.ru/developer-r/review/2193/doc/54040/>
3. Shishkin V.V., Churin A.E., Kharenko D.S., Shelemba I.S. Monitoring system of bearing structures of a football arena based on fiber-optic sensors. *Foton-ekspress = Photon-express*. 2013;(6):22–23. (In Russ.)
4. Hogan N. With fiber comes miles-long and multiplexed sensors. *Photonics Spectra*. 2015.
5. Yao J.P. Microwave photonics for high-resolution and high-speed interrogation of fiber Bragg grating sensors. *Fiber and Integrated Optics*. 2015:230–242.
6. Teryaeva O.V. *Mul'tisensornyye preobrazovateli informatsii na osnove volokonno-opticheskikh TsAP = Multisensory information converters based on fiber-optic DACs*. PhD dissertation. Samara, 2017:164. (In Russ.)
7. Grechishnikov V.M., Komarov E.G. Increasing the information capacity of a fiber-optic multi-sensor converter of binary mechanical signals into electrical ones. *Izmeritel'naya tekhnika = Measuring technology*. 2020;(9): 15–23. (In Russ.)
8. Zelenskiy V.A., Grechishnikov V.M. *Binarnyye volokonno-opticheskiye preobrazovateli v sistemakh upravleniya i kontrolya = Binary fiber-optic converters in control and control systems*. Samara: Samarskiy nauchnyy tsentr RAN, 2006:120. (In Russ.)
9. Grechishnikov V.M., Teryaeva O.V. *Metrologiya i radioizmereniya = Metrology and radio measurements*. Samara: Izd-vo Samarskogo nauchnogo tsentra RAN, 2018:166. (In Russ.)
10. Patent 2768522 Russian Federation. *Reguliruemyy opticheskiy attenyuator = Adjustable optical attenuator* / Grechishnikov V.M., Kapituurov A.E.; applicant and patent holder Samar. nats. issled. un-t im. S. P. Koroleva; № 2021106244; appl. 10.03.2021; publ. 24.03.2022. (In Russ.)
11. Grechishnikov V.M. *Skhemotekhnika volokonno-opticheskikh ustroystv = Circuitry of fiber-optic devices*. Samara: Izd-vo Samar. un-ta, 2018:172. (In Russ.)
12. *MicroCap 12*. Available at: <http://www.spectrum-soft.com/index.shtml>
13. *Mikroskhemy logarifmicheskikh usiliteley traditsionnoy skhemotekhniki = Microcircuits of logarithmic amplifiers of traditional circuitry*. (In Russ.). Available at: <https://kit-e.ru/usil/mikroshemy-logarifmicheskikh-usilitelej-tradiczionnoj-shemotehniki-2/>
14. *LOG114*. Available at: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/180720/BURR-BROWN/LOG114.html>
15. *TL071*. Available at: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/5779/MOTOROLA/TL071.html>
16. *NE4558*. Available at: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/17944/PHILIPS/NE4558.html>
17. *74F148*. Available at: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/50289/FAIRCHILD/74F148.html>
18. *74ALS74A*. Available at: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/15268/PHILIPS/74ALS74A.html>

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Михайлович Гречишников

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой электротехники,
Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С. П. Королева
(Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: gv@ssau.ru

Андрей Евгеньевич Капитуров

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

Ксения Борисовна Нерсиян

аспирант,
Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С. П. Королева
(Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: nersisyan-k@list.ru

Ольга Викторовна Теряева

кандидат технических наук,
доцент кафедры электротехники,
Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С. П. Королева
(Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: arefeva_olga@inbox.ru

Vladimir M. Grechishnikov

Doctor of technical sciences, professor,
head of the sub-department of electrical engineering,
Samara National Research University
named after Academician S.P. Korolev
(34 Moskovskoe highway, Samara, Russia)

Andrey E. Kapiturov

Postgraduate student,
Samara National Research University
named after Academician S.P. Korolev
(34 Moskovskoe highway, Samara, Russia)

Kseniya B. Nersisyan

Postgraduate student,
Samara National Research University
named after Academician S.P. Korolev
(34 Moskovskoe highway, Samara, Russia)

Ol'ga V. Teryaeva

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of electrical engineering,
Samara National Research University
named after Academician S.P. Korolev
(34 Moskovskoe highway, Samara, Russia)
E-mail: arefeva_olga@inbox.ru

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

Поступила в редакцию/Received 17.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 18.01.2022

Принята к публикации/Accepted 18.02.2022

РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ПОВТОРЕНИЯ ОБЩИХ СВЯЗЕЙ ДЛЯ НЕЙРОНОВ С ЧЕТЫРЬМЯ И ПЯТЬЮ ВХОДАМИ ПРИ СЛУЧАЙНОМ ВЫБОРЕ ИЗ 512 БИОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ДАННЫХ СОПОСТАВИМОГО КАЧЕСТВА

И.А. Крохин¹, М.Ю. Михеев², Л. Н. М. Пепел³

^{1,2,3} Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия
¹kr.ig.sv08@gmail.com, ²mix1959@gmail.com, ³nadiya.mix@gmail.com

Аннотация. В данной статье рассматривается атака Г. Б. Маршалко, направленная на упрощение задачи подбора ключа нейросетевого преобразователя биометрии в код. Имитационным моделированием вычислены вероятности появления разных стартовых условий для реализации атаки на нейронные сети с 512 входами. Исследованы сети с искусственными нейронами, имеющими по 4 и 5 входов.

Ключевые слова: нейронные сети, биометрия, имитационное моделирование, защита информации

Для цитирования: Крохин И. А., Михеев М. Ю., Пепел Л. Н. М. Расчет вероятностей повторения общих связей для нейронов с 4 и 5 входами при случайном выборе из 512 биометрических параметров для данных сопоставимого качества // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 3. С. 104–108. doi:10.21685/2307-4205-2022-3-13

CALCULATION OF THE PROBABILITIES OF REPETITION OF COMMON CONNECTIONS FOR NEURONS WITH 4 AND 5 INPUTS AT RANDOM SELECTION OF 512 BIOMETRIC PARAMETERS FOR DATA OF COMPARABLE QUALITY

I.A. Krohin¹, M.Yu. Mikheev², L.N.M. Pepel³

^{1,2,3} Penza State Technological University, Penza, Russia
¹kr.ig.sv08@gmail.com, ²mix1959@gmail.com, ³nadiya.mix@gmail.com

Abstract. This article discusses the attack of G.B. Marshalko aimed at simplifying the task of selecting a key for a neural network biometric converter into a code. Simulation modeling calculated the probabilities of occurrence of different starting conditions for the implementation of an attack on neural networks with 512 inputs. Networks with artificial neurons with 4 and 5 inputs have been studied.

Keywords: neural networks, biometrics, simulation modeling, information security

For citation: Krokhin I.A., Mikheev M.Yu., Pepel L.N.M. Calculation of the probabilities of repetition of common connections for neurons with 4 and 5 inputs at random selection of 512 biometric parameters for data of comparable quality. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(3):104–108. (In Russ.). doi:10.21685/2307-4205-2022-3-13

В России действует семь национальных стандартов технического комитета по стандартизации № 362 «Защита информации» и одна техническая спецификация ТК 026 «Криптографическая защита информации»¹. Обучение нейронных сетей с линейным накоплением данных выполняется по ГОСТ Р 52633.5². Если сеть из нейронов с линейным накоплением данных защищена физически, то длина выходного кода (число нейронов сети) может быть 256 бит. Если сеть защищена

¹ Техническая спецификация «Системы обработки информации. Криптографическая защита информации. Защита нейросетевых биометрических контейнеров с использованием криптографических алгоритмов», принята 19.11.2020 на XXV заседании технического комитета № 26.

² ГОСТ Р 52633.5–2011. Защита информации. Техника защиты информации. Автоматическое обучение нейросетевых преобразователей биометрия-код доступа.

криптографически, то длина выходного кода снижается примерно в 10 раз из-за угрозы реализации атак Маршалко [1]. Линейные нейроны в связи с угрозой атак Маршалко не должны иметь общие входные связи, соответственно, при 512 анализируемых сетью биометрических параметрах и применении нейронов с 16 входами криптографически, защищенная нейросеть должна состоять из $512 / 16 = 32$ нейронов.

Естественным является желание увеличить длину выходного ключа нейросети. Для достижения этой цели следует заменить линейные нейроны на квадратичные, как это показано на рис. 1. Из рис. 1 видно, что квадратичные нейроны имеют эллиптический квантователь, который существенно лучше линейного квантователя. Численные эксперименты показывают, что один квадратичный нейрон по своей мощности эквивалентен трем-четырем линейным нейронам. Верно и обратное утверждение: число входов у квадратичных нейронов оказывается меньше в три-четыре раза, чем у линейных нейронов, т.е. нейросеть, анализирующая 512 биометрических параметров при использовании квадратичных нейронов, может иметь длину выходного ключа $512/4 = 128$ бит.

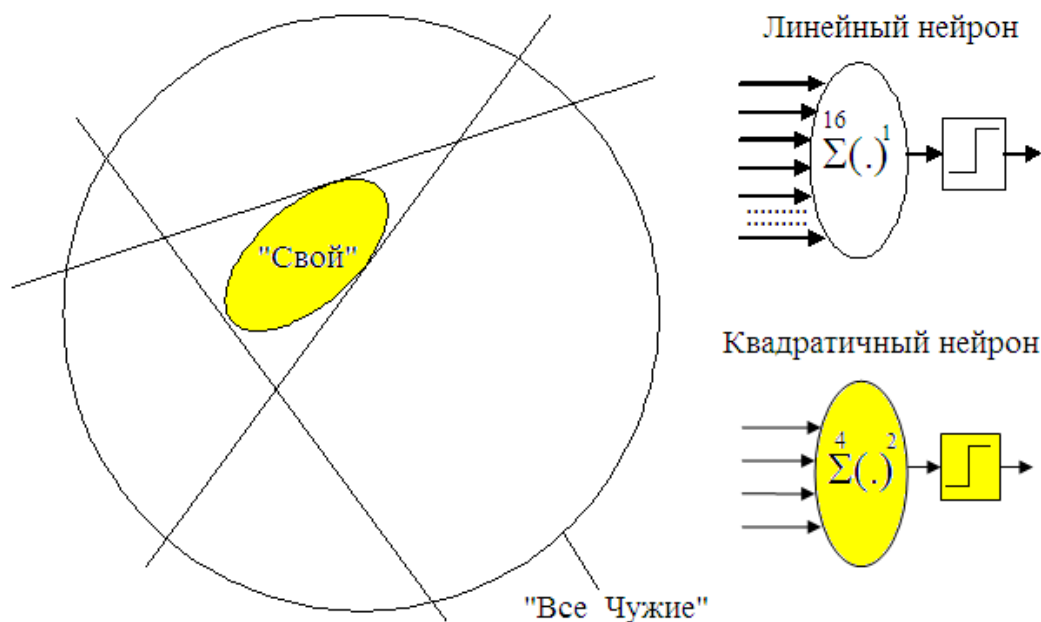


Рис. 1. Один квадратичный нейрон с эллиптической границей квантователя данных, эквивалентный по своей эффективности применению примерно трех-четырех линейных нейронов

Мы имеем значительное увеличение длины выходного кода ключа, если переходим от использования линейных нейронов к использованию квадратичных нейронов [2]. Еще одним важным преимуществом является то, что реализация атак Маршалко на квадратичные сети усложняется и допустимым является наличие одной общей входной связи у квадратичных нейронов с четырьмя входами. По этой причине число нейронов увеличивается. Ожидаемый рост числа нейронов может быть спрогнозирован имитационным моделированием и подтвержден реальными биометрическими данными.

Тестирование нейросетевых преобразователей биометрия-код предполагает наличие достаточно большой тестовой базы. Создать и хранить такую базу сложно, в том числе из-за законодательных ограничений. Национальные законодательства многих стран запрещают создавать и хранить базы биометрических образов без согласия на это доноров биометрии.

Для достижения задачи расчета вероятностей появления общих связей нейронов реализован генератор случайных биометрических параметров и анализатор общих связей у нейронов. Сбор статистических данных производился на протяжении 1000 итераций.

На рис. 2 приведены результаты имитационного моделирования по случайному выбору подключения четырех входов нейронов к 512 биометрическим параметрам.

Результатами имитационного моделирования является то, что при создании 256 нейронов в группе без связей с вероятностью $0,042$ будет находиться $256 \cdot 0,042 \approx 11$ нейронов.

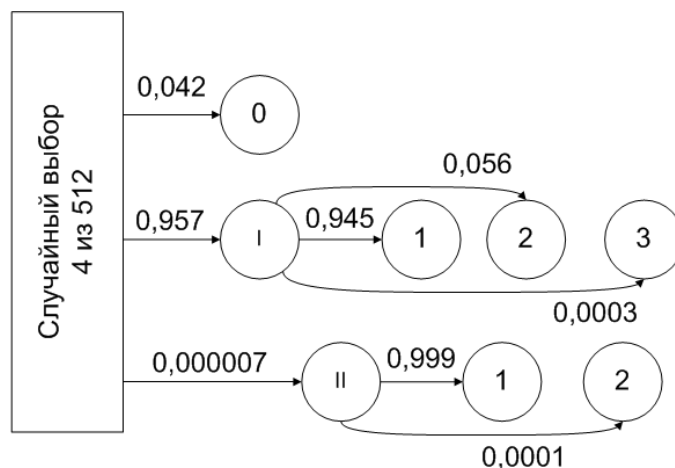


Рис. 2. Вероятностный граф появления нейронов с разным числом общих входных связей

Также появляются две группы нейронов с общими связями, которые распадаются на подгруппы нейронов с 1, 2 и 3 связями. При этом первая группа нейронов с общими связями возникает с вероятностью 0,957, следовательно, в ней будет находиться $256 \cdot 0,957 \approx 245$ нейронов. Это означает, что с высокой вероятностью в подгруппе с разрешенной одной общей связью окажется $245 \cdot 0,945 \approx 232$ нейронов. Вторая группа нейронов возникает с низкой вероятностью 0,000007. Если для квадратичных нейронов с четырьмя входами допустить наличие одной общей входной связи, то мы получим нейросетевой преобразователь биометрии в код длиной 243 бита.

На рис. 3 приведены результаты имитационного моделирования по случайному выбору подключения пяти входов нейронов к 512 биометрическим параметрам.

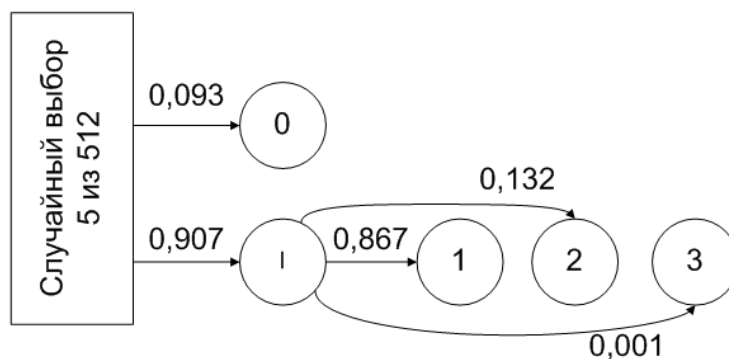


Рис. 3. Вероятностный граф появления нейронов с разным числом общих входных связей

Результатами имитационного моделирования является то, что при создании 256 нейронов в группе без связей с вероятностью 0,093 будет находиться $256 \cdot 0,093 \approx 24$ нейрона.

В свою очередь группа нейронов с общими связями распадается на группы нейронов с 1, 2 и 3 связями. При этом группа нейронов с одной общей связью возникает с вероятностью 0,867. Это означает, что в ней окажется $(256 \cdot 0,907) \cdot 0,867 \approx 201$ нейрон. Следовательно, для квадратичных нейронов с пятью входами при допустимом наличии одной общей входной связи мы получаем нейросетевой преобразователь биометрии в код длиной 225 бит.

Если предположить, что число общих связей, не позволяющих реализовать атаку Маршалко, должно быть менее половины, то допустимы оказываются два общих входа из пяти входов у соседних нейронов. Тогда общее число нейронов составит $256 \cdot (0,093 + 0,907 \cdot (0,867 + 0,132)) \approx 256$ нейрона. Чем хуже входные биометрические данные, тем больше должно быть входов у искусственных квадратичных нейронов, т.е. для «хороших» входных биометрических данных достаточно будет иметь нейроны с четырьмя входами, а для биометрических данных более низкого качества придется использовать квадратичные нейроны с пятью входами. Если предположить, что и те и другие нейроны встречаются равновероятно, то мы должны получать среднее число нейронов $(243 + 256) / 2 \approx 250$, что вполне приемлемо для биометрических приложений массового применения.

Таблицы связей и таблицы параметров квадратичных нейронов могут быть защищены шифрованием по технической спецификации при незначительных модификациях основного документа¹. Скорее всего, базовый документ может быть оставлен без изменений, если к нему будут выпущены методические рекомендации по его применению к криптографической защите таблиц нейросетей, состоящих из квадратичных нейронов².

Предположительно, развитие биометрических технологий с криптографической защитой по длине ключа постепенно приближается к обычным технологиям [3].

Список литературы

1. Marshalko G. V. On the security of a neural network-based biometric authentication scheme // Математические вопросы криптографии. 2014. Т. 5. С. 87–98.
2. Иванов А. И., Безяев А. В., Малыгина Е. А., Серикова Ю. И. Второй национальный стандарт России по быстрому автоматическому обучению больших искусственных нейронных сетей на малых выборках биометрических данных // Безопасность информационных технологий : сб. науч. ст. по материалам I Всерос. науч.-техн. конф. (г. Пенза, 24 апреля 2019 г.). Пенза, 2019. С. 174–177.
3. Ахметов Б. С., Иванов А. И., Фунтиков В. А. [и др.]. Технология использования больших нейронных сетей для преобразования нечетких биометрических данных в код ключа доступа : монография. Алматы : LEM, 2014. 144 с. URL: <http://portal.kazntu.kz/files/publicate/2014-06-27-11940.pdf>

References

1. Marshalko G.V. On the security of a neural network-based biometric authentication scheme. *Matematicheskie voprosy kriptografii = Mathematical questions of cryptography*. 2014;5:87–98.
2. Ivanov A.I., Bezyaev A.V., Malygina E.A., Serikova Yu.I. The second national standard of Russia for rapid automatic training of large artificial neural networks on small samples of biometric data. *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy: sb. nauch. st. po materialam I Vseros. nauch.-tekhn. konf. (g. Penza, 24 aprelya 2019 g.) = Information Technology security : a collection of scientific articles based on the materials of the I All-Russian scientific and technical conference (Penza, April 24, 2019)*. Penza, 2019:174–177. (In Russ.)
3. Akhmetov B.S., Ivanov A.I., Funtikov V.A. et al. *Tekhnologiya ispol'zovaniya bol'shikh neyronnykh setey dlya preobrazovaniya nechetkikh biometricheskikh dannykh v kod klyucha dostupa : monografiya = Technology of using large neural networks to convert fuzzy biometric data into an access key code : monograph*. Almaty: LEM, 2014:144. (In Russ.). Available at: <http://portal.kazntu.kz/files/publicate/2014-06-27-11940.pdf>

Информация об авторах / Information about the authors

Игорь Алексеевич Крохин

аспирант,
Пензенский государственный технологический
университет
(Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: kr.ig.sv08@gmail.com

Igor' A. Krokhin

Postgraduate student,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukov passage/Gagarin street,
Penza, Russia)

Михаил Юрьевич Михеев

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой информационных
технологий и систем,
Пензенский государственный технологический
университет
(Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: mix1959@gmail.com

Mikhail Yu. Mikheev

Doctor of technical sciences, professor,
head of the sub-department of informational
technologies and systems,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukov passage/Gagarin street,
Penza, Russia)

¹ Техническая спецификация «Системы обработки информации. Криптографическая защита информации. Защита нейросетевых биометрических контейнеров с использованием криптографических алгоритмов», принята 19.11.2020 на XXV заседании технического комитета № 26.

² Там же.

Лиана Надия Михайловна Пепел

магистрант,
Пензенский государственный технологический
университет
(Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: nadiya.mix@gmail.com

Liana Nadia M. Pepel

Master degree student,
Penza State Technological University
(1a/11 Baydukov passage/Gagarin street,
Penza, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 10.12.2021

Поступила после рецензирования/Revised 11.01.2022

Принята к публикации/Accepted 14.02.2022