

СОДЕРЖАНИЕ

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

Острейковский В. А., Сорочкин А. В., Юрков Н. К. РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ ЖИВУЧЕСТИ В ЗАДАЧАХ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТРУКТУРНО И ФУНКЦИОНАЛЬНО СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ДЛИТЕЛЬНЫМИ СРОКАМИ АКТИВНОГО СУЩЕСТВОВАНИЯ	5
Михеев М. Ю., Прокофьев О. В., Савочкин А. Е., Семочкина И. Ю. ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ В ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ	12
Острейковский В. А., Сорочкин А. В. ФЕНОМЕН «ЖИВУЧЕСТЬ» В ЗАДАЧАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ	21
Бойкова Т. В., Григорьев А. С., Маколкин Д. В., Королев С. А., Тутнов И. А. КАЧЕСТВО И НАДЕЖНОСТЬ ЭНЕРГОСИСТЕМ МАЛОЙ МОЩНОСТИ	28
Шмалько Е. Ю. МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ НА БАЗЕ ПРИНЦИПА СИНТЕЗИРОВАННОГО ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ.....	38
Иванов А. И., Тарасов Д. В., Горбунов К. А. ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЯ ХЕРСТА НА МАЛЫХ ВЫБОРКАХ: ПРОСТЕЙШИЙ ВАРИАНТ НЕЛИНЕЙНОГО КОМПЕНСАТОРА МЕТОДИЧЕСКИХ ОШИБОК ФЕДЕРА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ДАННЫХ ЭКОНОМИКИ И БИОМЕТРИИ.....	50

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**

Пономарев В. Н., Трофимов А. А., Дерябин Д. В., Фокина Е. А., Максов А. А. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	55
Полосин В. Г., Геращенко С. И., Геращенко М. С., Безбородова О. Е. МОДЕЛЬ УПРУГОЙ ОБОЛОЧКИ В СИСТЕМЕ АРТЕРИЯ – МАНЖЕТА	62
Якимов А. Н. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ НА ИЗЛУЧЕНИЕ МИКРОВОЛНОВЫХ АНТЕНН	74
Кикот В. В., Данилова Е. А., Трофимов А. А., Жуков Т. О. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ ИЗ КЕРАМИКИ ТИПА ЦИРКОНАТ-ТИТАНАТ СВИНЦА	83

Костин А. В., Богданов Д. С., Бобров И. С.

АНАЛИЗ ТЕПЛООВОГО ВЛИЯНИЯ ДВУХ ВНУТРЕННИХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ
ПЕЧАТНЫХ ПРОВОДНИКОВ ПЛАТЫ, УСТАНОВЛЕННЫХ
НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЕ ОСНОВАНИЕ И РАСПОЛОЖЕННЫХ В ОДНОМ СЛОЕ..... 90

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

Данилин М. Е., Заяра А. В., Федулов В. Д.

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ВИРТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ
АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ В СИСТЕМАХ
УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ 100

CONTENT

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

Ostreykovskiy V.A., Sorochkin A.V., Yurkov N.K.
DEVELOPMENT OF METHODS OF SURVIVABILITY THEORY IN PROBLEMS
OF DURABILITY OF STRUCTURALLY AND FUNCTIONALLY COMPLEX
DYNAMIC SYSTEMS WITH LONG PERIODS OF ACTIVE EXISTENCE 5

Mikheev M.Yu., Prokofiev O.V., Savochkin A.E., Semochkina I.Yu.
ENSURING RELIABILITY IN THE LIFE CYCLE OF RESPONSIBLE
ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS 12

Ostreykovskiy V.A., Sorochkin A.V.
THE PHENOMENON OF «SURVIVABILITY» IN PROBLEMS
OF ENSURING RELIABILITY OF COMPLEX CRITICAL DYNAMIC SYSTEMS 21

Boykova T.V., Grigoriev A.S., Makolkin D.V., Korolev S.A., Tutnov I.A.
QUALITY AND RELIABILITY OF LOW-POWER POWER SYSTEMS 28

Shmalko E.Yu.
MACHINE LEARNING OF CONTROL SYSTEMS WITH FEEDBACK
BASED ON THE PRINCIPLE OF SYNTHESIZED OPTIMAL CONTROL 38

Ivanov A.I., Tarasov D.V., Gorbunov K.A.
HURST EXPONENT ESTIMATES ON SMALL SAMPLES: THE SIMPLEST
VERSION OF FEDER'S NON-LINEAR METHOD ERROR COMPENSATOR
FOR MODELING ECONOMIC AND BIOMETRIC DATA 50

**DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION
AND ELECTRONIC EQUIPMENT**

Ponomarev V.N., Trofimov A.A., Deryabin D.V., Fokina E.A., Maksov A.A.
DESIGN OF THE TEMPERATURE SENSOR BY SIMULATION MODELING 55

Polosin V.G., Gerashchenko S.I., Gerashchenko M.S., Bezborodova O.E.
MODEL OF THE ELASTIC SHELL IN THE ARTERY – CUFF SYSTEM 62

Yakimov A.N.
MODELING OF THE INFLUENCE OF PRODUCTION ERRORS
ON THE RADIATION OF MICROWAVE ANTENNAS 74

Kikot V.V., Danilova E.A., Trofimov A.A., Zhukov T.O.
INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF INCREASED TEMPERATURE
ON THE TECHNICAL CHARACTERISTICS OF PIEZO ELEMENTS
FROM CERAMICS OF THE ZIRCONATE-TITANATE LEAD TYPE 83

Kostin A.V., Bogdanov D.S., Bobrov I.S.

ANALYSIS OF THE THERMAL EFFECT OF TWO INTERNAL PARALLEL PRINTED CIRCUIT BOARD CONDUCTORS MOUNTED ON A METAL BASE AND LOCATED IN ONE LAYER..... 90

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

Danilin M.E., Zayara A.V., Fedulov V.D.

PROPOSALS FOR ORGANIZING VIRTUAL TESTS OF OBJECT RECOGNITION ALGORITHMS IN CONTROL SYSTEMS OF MOBILE ROBOTIC COMPLEXES 100

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА

FUNDAMENTALS OF RELIABILITY AND QUALITY ISSUES

УДК 517.98 : 519.2 : 621:039
doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-1

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ТЕОРИИ ЖИВУЧЕСТИ В ЗАДАЧАХ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СТРУКТУРНО И ФУНКЦИОНАЛЬНО СЛОЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ДЛИТЕЛЬНЫМИ СРОКАМИ АКТИВНОГО СУЩЕСТВОВАНИЯ

В. А. Острейковский¹, А. В. Сорочкин², Н. К. Юрков³

^{1,2} Сургутский государственный университет, Сургут, Россия

³ Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ academicostr@yandex.ru, ² sorochkin_av@surgu.ru, ³ yurkov_nk@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Последние десятилетия XX в. и новые десятилетия XXI в. характеризуются, с одной стороны, дальнейшим повышением конструктивной сложности и одновременно требованиям обеспечения высокого качества сложных критически важных систем. Особенно это относится к системам с длительными сроками активного существования и зачастую изготавливается малыми партиями или вообще в единичном экземпляре. *Материалы и методы.* Для решения задачи обеспечения надежности и безотказности указанных выше систем необходимо использовать современные математические и конструктивные методы и подходы к оценке показателей их долговечности и живучести. На решение этой проблемы и направлена настоящая статья. *Результаты и выводы.* Получены новые результаты применения современного функционального анализа в дополнение к существующим методам оценки показателей ресурса и срока службы, используемых как правило в основе теории длительной прочности. Показана возможность описания функционирования неустойчивых и необратимых процессов в сложных системах в модусах «прошлое–настоящее–будущее» время, т.е. учитывающая фактор асимметрии внутреннего времени («возраст системы»).

Ключевые слова: исходный ресурс, остаточный ресурс, повреждаемость, зарождение дефектов, долговечность, живучесть, внутреннее время

Для цитирования: Острейковский В. А., Сорочкин А. В., Юрков Н. К. Развитие методов теории живучести в задачах долговечности структурно и функционально сложных динамических систем с длительными сроками активного существования. 2023. № 3. С. 5–11. doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-1

DEVELOPMENT OF METHODS OF SURVIVABILITY THEORY IN PROBLEMS OF DURABILITY OF STRUCTURALLY AND FUNCTIONALLY COMPLEX DYNAMIC SYSTEMS WITH LONG PERIODS OF ACTIVE EXISTENCE

V.A. Ostreykovskiy¹, A.V. Sorochkin², N.K. Yurkov³

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

³ Penza State University, Penza, Russia

¹ academicostr@yandex.ru, ² sorochkin_av@surgu.ru, ³ yurkov_nk@mail.ru

Abstract. Background. The last decades of the XX century and the new decades of the XXI century are characterized, on the one hand, by a further increase in the constructive complexity and at the same time the requirements for ensuring high quality of complex critical systems. This is especially true for systems with long periods of active existence and is often manufactured in small batches or in general in a single copy. **Materials and methods.** To solve the problem of ensuring the reliability and reliability of the above-mentioned systems, it is necessary to use modern mathematical and constructive methods and approaches to assessing the indicators of their durability and survivability. This article is aimed at solving this problem. **Results and conclusions.** New results of the application of modern functional analysis have been obtained in addition to the existing methods for assessing resource and service life indicators, which are usually used as the basis of the theory of long-term strength. The possibility of describing the functioning of unstable and irreversible processes in complex systems in the modes of "past-present-future" time, i.e. taking into account the factor of asymmetry of internal time ("age of the system"), is shown.

Keywords: initial resource, residual resource, damage, origin of defects, long-eternity, survivability, internal time

For citation: Ostreykovskiy V.A., Sorochkin A.V., Yurkov N.K. Development of methods of survivability theory in problems of durability of structurally and functionally complex dynamic systems with long periods of active existence. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(3):5–11. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-1

Введение

К началу XX в. наука о долговечности сложных высокоответственных систем достигла больших успехов. Так, человечество имеет положительный опыт проектирования и эксплуатации структурно и функционально сложных систем (СФСС) в высокотехнологичных отраслях с величиной ресурса и срока службы до 30–60 лет. В то же самое время появились требования к ресурсу до 80–100 лет в энергетической отрасли, медицине, космологии и других отраслях науки и технологий. Поэтому возникли тенденции к дальнейшему повышению показателей долговечности будущих СФСС. В этом смысле необходимы дальнейшие разработки методов обеспечения повышения ресурса и долговечности критически важных сложных систем. На решение этой вечной проблемы времени и направлена данная статья.

Анализ математических моделей ресурса по критериям повреждаемости и зарождения дефектов в конструкционных материалах элементов сложных систем

В настоящее время установлено, что причиной зарождения дефектов в конструкционных материалах элементов сложных систем являются повреждаемость как характеристика, приводящая к образованию дефектов. При этом важным критерием является условие предельного повреждения:

$$a_{\text{пр}} = 1. \quad (1)$$

Основными физико-химическими причинами этих процессов являются малоцикловая усталость материалов, кислородное и хлоридное растрескивание и образование дефектов возле отложения меди. Таким образом выполняется условие (1).

Обычно условие (1) разделяют на два компонента: механическую усталость и коррозионные дефекты. Поэтому их принято различать следующим образом:

1) для механических усталостных повреждений используется соотношение

$$a_{\text{МП}} = \sum_{i=1}^l \frac{N_i}{[N_{0i}]}, \quad (2)$$

где N_{0i} – допускаемое число циклов при i -м типе расчетного режима изменений напряжений, а N_i – число циклов при i -м типе расчетного режима изменений напряжений;

2) для повреждаемости от коррозионных дефектов в момент времени по формуле

$$a_{\text{КП}} = \int_0^{\tau} \frac{d\tau}{\tau_{\text{кз}}}, \quad (3)$$

где $a_{\text{КП}}$ – повреждаемость от коррозионных дефектов в момент времени τ ; $\tau_{\text{кз}}$ – время до зарождения дефектов от коррозионных воздействий;

3) для случая совместного учета механических и коррозионных дефектов повреждаемость определяется суммированием повреждаемостей от каждого фактора по формуле

$$a_n = \frac{a_{n1}}{(1-a_{n2})(1-a_{n3})(1-a_{n4})\dots}, \quad (4)$$

где $a_{n1}, a_{n2}, a_{n3}, \dots$ – ранжирование повреждаемости от каждого фактора.

Следовательно, выражения (1) и (4) определяют возможность зарождения дефектов от совместного действия как механических, так и коррозионных факторов. Так как характеристики повреждаемостей в соответствии с выражениями (2) и (3) являются случайными величинами и поэтому естественно, что искомые повреждаемости описываются статистическими распределениями, то вероятность зарождения дефектов

$$P_3 = P(a_n \geq 1), \quad (5)$$

где P_3 – вероятность зарождения дефекта в любом месте конструкции.

Если при этом предположить, что дефекты могут возникать: 1) с различными статистическими распределениями и 2) нелинейными зависимостями, то вероятность зарождения любых дефектов может быть оценена методами статистического моделирования (в частности, методом Монте-Карло). Поэтому возникает задача об определении числа зарождающихся дефектов в зависимости от времени эксплуатации объекта, т.е. задача типовой модели оценки живучести системы [1]. Для решения этой сложной задачи каждая часть системы разбивается на элементы с учетом значений различных групп факторов:

- 1) параметров нагружения, давления и температуры;
- 2) однородности напряженно-деформированного состояния (НДС);
- 3) степени дефектности;
- 4) свойств материалов.

При решении этой задачи элементы системы разбиваются на ячейки в предположении о том, что зарождение трещин в любом месте конструкции оценивается методами статистического моделирования Монте-Карло.

Аналитические зависимости показателей надежности элементов конструкции систем

Известно [1, 2], что количественные значения показателей надежности и готовности оборудования сложных систем можно оценивать заивисимостями показателей, приведенных в табл. 1¹.

Таблица 1

Показатели надежности оборудования СФСС

Наименование показателя	Обозначение	Вид аналитической зависимости
1. Средняя наработка до отказа	T_0	$\int_0^{\infty} \left\{ \exp \left[- \int_0^t \sum_{i=1}^N \lambda_i(\tau) \times d\tau \right] \right\} dt$
2. γ – процентная наработка до отказа	T_γ	$\exp \left[- \int_0^T \sum_{i=1}^N \lambda_i(\tau) \times d\tau \right]$
3. Средний ресурс до списания (полный)	$T_{\text{ср}}$	$\int_0^{\infty} \left\{ \exp \left[- \int_0^t \sum_{i=1}^N \tau_i^j \times d\tau \right] \right\} dt$
4. γ – процентный ресурс до списания (полный)	$T_{\text{п}\gamma}$	$\frac{\gamma}{100} = \exp \left[- \int_0^{T_{\text{ср}} - T_{\text{п}\gamma}} \sum_{i=1}^N \tau_i^j \times d\tau \right]$
5. Среднее время восстановления	$T_{\text{вср}}$	$T_0 \times \sum_{i=1}^N [T_{\text{вср}}^i \times \tau_N^i(\tau)]$
6. Коэффициент готовности	K_Γ	$\prod_{i=1}^N \frac{T_0^i}{T_0^i + T_{\text{вср}}^i}$

¹ ГОСТ 27.002–2015. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Термины и определения.

По результатам табл. 1 можно сказать:

1. Формулы пп. 1, 2, 5 и 6 из табл. 1 характеризуют работоспособность систем до первого отказа.
2. В п. 6 табл. 1 приняты следующие обозначения: T_0^i – функция наработки до отказа i -го элемента составной единицы; $T_{всп}^i$ – среднее время восстановления i -го элемента составной единицы.

3. Основой выбора критериев является сравнение значений показателей надежности для оборудования проектируемых систем или их модернизации.

4. И, по-видимому, самое главное: к настоящему времени сложилось мнение, что критерий надежности СФСС должен быть обеспечен, если одновременно обеспечены следующие четыре принципа надежности элементов:

- а) безопасная работа всех основных элементов СФСС в целом;
- б) вероятность перевода элемента в безопасное состояние при возникновении отказа в нем (принципы безопасности отказа);
- в) обеспечение необходимого значения коэффициентов готовности;
- г) оптимальные затраты на проведение ремонтных работ, связанных с его отказом.

На основе первого принципа допустимый уровень показателя надежности определяется по данным вероятностного анализа безопасности (ВАБ) соответствующей СФСС, т.е. при данных значениях показателей надежности обеспечивается безопасность работы всей СФСС. Например, для атомных электростанций (АЭС) в соответствии с отечественными и зарубежными требованиями по безопасности вероятность повреждения активной зоны реактора не превышает 10^{-5} на реактор в год.

Второй принцип надежности СФСС обеспечен в том случае, если по конструкторской и нормативной документации определяется допустимый уровень показателей надежности с точки зрения обеспечения перевода элементов СФСС в безопасное состояние при возникновении в нем отказа.

Третий принцип надежности СФСС обеспечен тогда, когда коэффициенты готовности элементов сложных систем должны удовлетворять требуемому коэффициенту готовности всей сложной системы.

Четвертый принцип надежности связан с установлением взаимосвязи между допустимыми показателями и необходимым коэффициентом экономической эффективности эксплуатации элемента и СФСС в целом.

Обеспечение соответствия полученных в расчете показателей надежности оборудования СФСС с требуемыми можно повысить, например, за счет изменения периодичности контроля металла, конструктивных элементов, изменения требований к дефектоскопическому контролю в части допустимых размеров дефектов, уточнением сроков службы аппаратуры контроля и т.д.

Физическая сущность контроля учета эффекта асимметрии внутреннего времени в задачах оценки долговечности оборудования критически важных систем длительного активного существования

В последней четверти XIX и первой четверти XX в. Академией науки СССР была издана серия книг «Исследование напряжений и прочности ядерных реакторов», в которых были изложены современные результаты фундаментальных и прикладных работ в области прочности, ресурса и безопасности водо-водяных реакторов ядерных энергетических установок (ЯЭУ) на основе динамики длительной прочности¹. Однако уже в конце XIX в. появились научные результаты, в которых было теоретически строго доказано наличие эффекта асимметрии времени [3] в сложных системах при наличии неустойчивостей и необратимых процессов в процессе применения по назначению. В связи с этим возникла необходимость применения новых подходов к анализу долговечности оборудования СФСС [2], с применением современных математических методов теории операторов функционального анализа.

Научно-техническая революция середины и конца XX в. обогатила науку новым подходом в теории асимметрии времени. В центре идей были работы научных школ А. М. Ляпунова, В. И. Вернадского и И. П. Пригожина. Многочисленные исследования в этих работах свидетельствуют, что неустойчивые и необратимые процессы имеют свои особенности на трех уровнях описания субмикроскопических, микроскопических и макроскопических систем. Установлено, что причинами сложных деформационных процессов, приводящих к отказам и катастрофам СФСС, являются

¹ ГОСТ 27.002–2015. Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Термины и определения.

коррозия, эрозия, износ усталость, деформация и другие макроскопические процессы. В указанных и других макроскопических процессах первопричинами служат необратимые процессы типа химических реакций, диффузии, распада твердых растворов, адсорбции и др. Причем необратимые процессы обычно развиваются под действием комплекса внешних и внутренних эксплуатационных факторов внешней среды (температуры, влажности, давления, динамических и статических механических нагрузок, термодинамических ударов, облучения, воздействия электрических, магнитных и других полей), а также влияния человеческого фактора [4, 5].

Физический и математический смысл оператора внутреннего времени T детально изложен и теоретически обоснован в работах [3, с. 162–163, 220–225; 2, с. 69–111] и состоит в следующем: в его основу положено соотношение между унитарным оператором движения $U = e^{-iLt}$ и нелокальным оператором T :

$$U_L^T T U_L = T + tI, \quad (6)$$

где L – линейный оператор Лиувилля; I – единичный оператор.

В работах [2] и [3] доказано, что оператор внутреннего времени порождает описание классической динамики, характерной для сильно неустойчивых систем. При этом каждая функция распределения состояния системы ρ может быть разложена по собственным функциям $\{I, \varphi_{n,i}\}$

$$\rho = I + \sum_{n=-\infty}^{+\infty} C_n \varphi_{n,i},$$

где ρ – собственное значение оператора T ; i – степень вырождения собственного значения n .

Тогда не составляет большого труда доказать следующее утверждение: если оператор внутреннего времени существует, то каждому состоянию системы ρ могли быть поставлены в соответствие средний возраст (ресурс) T_ρ по формулам

$$T_\rho = \frac{\bar{\rho}, T \bar{\rho}}{\bar{\rho}, \bar{\rho}},$$

и в соответствии с формулой (6):

$$T_{\rho_i} = T_{\rho_0} + t_i \dots$$

Отсюда следует, что средний возраст состояния системы ρ соответствует состоянию системы в момент времени t_i . Но необходимо отметить: внутреннее время существенно отличается от внешнего времени, отсчитываемого по наручным часам. Оно, по меткому выражению И. П. Пригожина [3], соответствует средней глобальной оценке объекта, а не какой-либо его части.

Причем на внутреннее время существенно оказывают влияние:

- а) изменения в составе эксплуатационной прочности, опыт, квалификация;
- б) изменения климата;
- в) изменения эксплуатационных требований и т.д. к контрольному оборудованию;
- г) влияния отказов и замен как техники, так и обслуживающего персонала;
- д) климат, персонал (грамотность, культура и т.д.).

Заключение

1. Выполненный анализ математических моделей по критериям повреждаемости и зарождения дефектов в конструкционных материалах элементов СФСС показал, что основными причинами являются механическая усталость и коррозионные процессы. При этом возникает задача об определении числа зарождающихся дефектов во времени применения СФСС по назначению, т.е. задача оценки живучести и долговечности систем [7].

2. Одной из главных характеристик оценки свойств живучести СФСС в соответствии с современной методологией механики разрушения является вероятность разрушения системы из-за образования сквозных дефектов или крупномасштабного разрушения конструкционных материалов оборудования. Для количественного определения этой вероятности используются следующие показатели:

- условная вероятность образования сквозного дефекта и крупномасштабного разрушения элемента конструкции СФСС в момент t расчетного события;
- вероятности образования сквозных дефектов или крупномасштабного разрушения от нескольких дефектов в элементах с учетом возникновения расчетных событий;
- полные вероятности образования сквозных дефектов и крупномасштабного разрушения конструкции оборудования.

3. Для определения количественных значений показателей безотказности и долговечности в теории надежности и готовности оборудования СФСС необходимо в соответствии с требованиями ГОСТ 27.002–2015 знать значения:

- функции распределения времени до отказа и до перехода в предельное состояние и интенсивности отказов элементов оборудования СФСС;
- средней наработки до отказа;
- γ -процентной наработки до отказа;
- среднего ресурса до списания (полный);
- γ -процентного ресурса до списания (полный);
- среднего времени восстановления;
- коэффициента долговечности.

4. Критерий надежности СФСС должен быть обеспечен, если одновременно выполнены четыре принципа надежности элементов:

- безопасная работа всех основных элементов СФСС в целом;
- принципы безопасного отказа элементов;
- обеспечение необходимого значения коэффициента готовности;
- оптимальные затраты на проведение ремонтных работ, связанных с его отказом.

5. В период с 1987 по 2009 г. в России были изданы девять томов серии книг «Исследование напряжений и прочности ядерных реакторов», посвященных результатам фундаментальных и прикладных разработок области прочности, ресурса и безопасности водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) и выполненных на базе проекта научно-образовательного центра Института машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН), Опытно-конструкторского бюро «Гидропресс». В результате развития предложенных методов и критериев обоснования прочности, ресурса и живучести предложены единые подходы к поэтапному определению нормирования, результирования и повышения ресурса и безопасности новых поколений ВВЭР с учетом штатных и нештатных режимов эксплуатации. Вместе с тем необходимо пожелать научным работникам указанных организаций обратить внимание на новые подходы к обоснованию надежности, безопасности и живучести таких сложных и высокоопасных комплексов, как ВВЭР в режимах их эксплуатации, и использовать методы и модели теории асимметрии внутреннего времени [3–5].

Список литературы

1. Махутов Н. А., Фролов В. К., Драгунов Ю. Г. [и др.]. Исследования напряжений и прочности ядерных реакторов. Анализ риска и повышение безопасности водо-водяных энергетических реакторов / под ред. Н. А. Махутова и М. М. Гадениной. М. : Наука, 2009. 499 с.
2. Острейковский В. А., Шевченко Е. Н. Математическое моделирование эффекта асимметрии внутреннего времени в теории долговечности структурно и функционально сложных критически важных систем // Итоги науки : тр. Междунар. симп. по фундамент. и приклад. проблемам науки. М. : РАН, 2018. Вып. 37. С. 69–111.
3. Пригожин И. Р. От существующего к возникающему: время и сложность в физических науках / под ред. Ю. Л. Климонтовича. М. : Едиториал URSS, 2002. 288 с.
4. Острейковский В. А., Денисова Т. Ю., Шевченко Е. Н. Асимметрия времени в теории прогнозирования состояния динамических систем : монография. Сургут : Печатный мир, 2018. 574 с.
5. Острейковский В. А., Лысенкова С. А., Шевченко Е. Н. О возможности использования эффекта асимметрии времени в задачах оценки долговечности сложных технических систем // Надежность и качество сложных систем. 2019. № 1. С. 21–34.
6. Панкин А. М. Основные вопросы методологии диагностирования сложных технических объектов // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 2. С. 62–69. doi: 10.21685/2307-4205-2021-2-6
7. Северцев Н. А., Дарьина А. Н. Применение критериев подобия при ресурсной отработке сложных технических систем и изделий // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 4. С. 5–14. doi: 10.21685/2307-4205-2020-4-1

References

1. Makhutov N.A., Frolov V.K., Dragunov Yu.G. et al. *Issledovaniya napryazheniy i prochnosti yadernykh reaktorov. Analiz riska i povyshenie bezopasnosti vodo-vodyanykh energeticheskikh reaktorov = Stress and strength studies of nuclear reactors. Risk analysis and improving the safety of water-water power reactors.* Moscow: Nauka, 2009:499. (In Russ.)
2. 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: tr. Mezhdunar. simp.po fundam. i priklad. problemam nauki = Results of science : proceedings of the International symposium by the foundation and the applied problems of science.* Moscow: RAN, 2018;(37):69–111. (In Russ.)
3. Prigozhin I.R. *Ot sushchestvuyushchego k voznikayushchemu: vremya i slozhnost' v fizicheskikh naukakh = From the existing to the emerging: time and complexity in the physical sciences.* Moscow: Editorial URSS, 2002:288. (In Russ.)
4. Ostreykovskiy V.A., Denisova T.Yu., Shevchenko E.N. *Asimetriya vremeni v teorii prognozirovaniya sostoyaniya dinamicheskikh sistem: monografiya = Time asymmetry in the theory of predicting the state of dynamic systems : monograph.* Surgut: Pechatnyy mir, 2018:574. (In Russ.)
5. Ostreykovskiy V.A., Lysenkova S.A., Shevchenko E.N. On the possibility of using the time asymmetry effect in the problems of assessing the durability of complex technical systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2019;(1):21–34. (In Russ.)
6. Pankin A.M. The main issues of methodology of diagnostics of complex technical objects. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2021;(2):62–69. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2021-2-6
7. Severtsev N.A., Dar'ina A.N. Application of similarity criteria in resource testing of complex technical systems and products. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2020;(4):5–14. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2020-4-1

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, пр-т Ленина, 1)
E-mail: academicostr@yandex.ru

Андрей Викторович Сорочкин

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

Николай Кондратьевич Юрков

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

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)

Andrey V. Sorochkin

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

Nikolay K. Yurkov

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

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

Поступила в редакцию/Received 20.05.2023

Поступила после рецензирования/Revised 19.06.2023

Принята к публикации/Accepted 24.07.2023

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ В ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ СИСТЕМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ОТВЕТСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

М. Ю. Михеев¹, О. В. Прокофьев², А. Е. Савочкин³, И. Ю. Семочкина⁴

^{1, 2, 3, 4} Пензенский государственный технологический университет, Пенза, Россия
¹ mix1959@gmail.com, ² prokof_ow@mail.ru, ³ aebrat@mail.ru, ⁴ ius1961@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* За последние несколько лет произошло резкое расширение возможностей систем искусственного интеллекта (ИИ), что одновременно привело к новым рискам и потенциальным преимуществам. Автономизация систем, позволяющая перейти от поддержки принятия решений к самостоятельной выработке решения, предоставляет противоречивые результаты в областях ответственного применения в таких чувствительных сферах применения, как здоровье человека, его экологическая среда проживания, экономический и социальный статус. В области вооружений обсуждаются средства создания автономных систем нового поколения и связанной с ними концепции будущей «гипервойны». *Материалы и методы.* Из-за растущего использования ИИ во всем мире в перечисленных чувствительных областях возникает запрос на надежность при использовании таких автономных систем. Необходимо сформулировать риски и преимущества этой технологии, включая соблюдение фундаментальных этических принципов. Применение критически важных решений должно контролироваться человеком, несущим ответственность. Меры по обеспечению надежности автономной системы с ИИ должны быть предусмотрены на всех этапах жизненного цикла и только таким образом можно контролировать риски и создавать объяснимый и управляемый ИИ. *Результаты и выводы.* Авторами изложена концепция понятия «надежного» ИИ и описана реализация отдельных ее положений на этапах жизненного цикла автономной системы ответственного назначения.

Ключевые слова: надежность системы искусственного интеллекта, система ответственного назначения, принятие решений автономной системой

Финансирование: работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 23-21-10046, <https://rscf.ru/project/23-21-10046/>

Для цитирования: Михеев М. Ю., Прокофьев О. В., Савочкин А. Е., Семочкина И. Ю. Обеспечение надежности в жизненном цикле систем искусственного интеллекта ответственного назначения // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 12–20. doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-2

ENSURING RELIABILITY IN THE LIFE CYCLE OF RESPONSIBLE ARTIFICIAL INTELLIGENCE SYSTEMS

M.Yu. Mikheev¹, O.V. Prokofiev², A.E. Savochkin³, I.Yu. Semochkina⁴

^{1, 2, 3, 4} Penza State Technological University, Penza, Russia
¹ mix1959@gmail.com, ² prokof_ow@mail.ru, ³ aebrat@mail.ru, ⁴ ius1961@gmail.com

Abstract. *Background.* Over the past few years, there has been a dramatic expansion in the capabilities of artificial intelligence (AI) systems, which has simultaneously led to new risks and potential benefits. The autonomy of systems, which allows moving from decision support to self-development of a decision, provides conflicting results in areas of responsible application. Such sensitive areas of application as human health, its ecological living environment, economic and social status. In the field of armaments, the means of creating autonomous systems of a new generation and the concept of a future «hyperwar» associated with them are discussed. *Materials and methods.* Due to the growing use of AI around the world in these sensitive areas, there is a demand for reliability when using such autonomous systems. It is necessary to formulate the risks and benefits of this technology, including compliance with fundamental ethical principles. The application of critical decisions must be controlled by the person in charge. Measures to ensure the reliability of an autonomous system with AI must be provided at all stages of the life cycle, and only in this way it is possible to control risks and create explainable and manageable AI. *Results and conclusions.* The authors outlined the concept of the concept of «reliable» AI and described the implementation of its individual provisions at the stages of the life cycle of an autonomous system for responsible purposes.

Keywords: reliability of the artificial intelligence system, responsible assignment system, decision-making by an autonomous system

Financing: the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 23-21-10046, <https://rscf.ru/project/23-21-10046/>

For citation: Mikheev M.Yu., Prokofiev O.V., Savochkin A.E., Semochkina I.Yu. Ensuring reliability in the life cycle of responsible artificial intelligence systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(3):12–20. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-2

Введение

Важность искусственного интеллекта (ИИ) резко возросла за последние годы. В это же время этический аспект ИИ недостаточно исследован в сферах ответственного применения, в частности, в военной сфере [1]. Противоречивые аспекты использования методов ИИ в качестве компонента систем вооружения – это сложная область исследований, связанная с созданием непредсказуемых рисков. Тем не менее имеется потенциальная возможность повысить точность и масштабируемость воздействия оружия, что ведет к потенциальной минимизации ненужного ущерба или жертв, спасению человеческих жизней и ресурсов. Поэтому следует определить наиболее насущные аспекты для исследований и разработок, необходимых в этой области, чтобы гарантировать ответственное, безопасное и контролируемое использование этой технологии, а также прозрачность поведения этих систем. Реализация этих аспектов имеет основополагающее значение для приемлемости систем вооружения на базе ИИ. Кроме того, системы искусственного интеллекта любой степени сложности могут быть жизненно важной частью глобальной системы, включающей множество различных сенсорных и активных технических подсистем, а также людей. Кроме того, диапазон применения простирается от тактического уровня решений в конкретной ситуации до стратегического уровня, направленного на ситуационную осведомленность и комплексную поддержку принятия решений. Особый вопрос – аспект квалификации (оценки) и тестирования систем ИИ. Текущее состояние техники не дает определения процедур тестирования, специфичных для ИИ, не вызывает доверия и не гарантирует предсказуемость [1]. Это приводит к противоречиям между разработчиками и производителями вооруженных систем искусственного интеллекта с одной стороны, операторов (военных) с другой стороны и исследовательским сообществом посередине. Это поднимает вопрос о надежности как соответствии и предсказуемости систем ИИ, которые можно гарантировать при любых обстоятельствах. Определение концепции надежного ИИ также связано с необходимым и достаточным уровнем самостоятельности действий системы ИИ. Чем больше статические правила и ограниченная свобода системы ИИ, тем больше предсказуемость и последовательность результатов. С другой стороны, большая свобода для системы ИИ может повысить ее универсальность и полезность, а также увеличивает объем ответственности разработчика и оператора. Здесь ни оптимальный компромисс, ни лучшая практика не ясны и не требуют дальнейших исследований.

Целью данного исследования является формирование понятия надежности применительно к автономным системам ответственного назначения, управляемым искусственным интеллектом, а также методы и средства обеспечения надежности во время выполнения этапов жизненного цикла систем.

Материалы и этапы исследования

В результате обзора [1–12] авторами выявлено, что наибольшее внимание исследователей привлечено к автономным вооружениям, которые далее использованы в качестве характерного примера разрабатываемых систем ответственного назначения.

Ниже представлена выявленная «эталонная» структура жизненного цикла. Он состоит из четырех фаз (этапов): разработка, управление, подготовка миссии и применение. Эти четыре этапа предназначены для охвата всего процесса: от разработки военных систем искусственного интеллекта до их использования и обеспечения отслеживаемости. Процессу присущи этапы регулирования, адаптации и обратной связи. Первая фаза – это этап разработки. Для обеспечения надежности должны использоваться адекватные процессы, методы и приемы, аналогичные известным из техники безопасности. Для обеспечения ключевых свойств систем военного назначения с компонентами ИИ ключевые требования (в частности, связанные с надежностью) разрабатываемой системы должны быть проанализированы, корректно сформулированы и представлены в форме системной архитектуры. Вторая фаза – квалификационная оценка, которая в контексте ответственного применения должна

проводиться независимой экспертизой с персоналом, обученным в том числе в области права и этики, и сосредоточена конкретно на критических точках в приложениях ИИ (фаза управления). Поскольку каждая военная миссия имеет уникальные требования к системе ИИ, на третьем этапе рассматривается адаптация к конкретной миссии. Начиная с определения цели миссии на языке системы и в соответствии с правилами взаимодействия с системой, этот этап может быть описан как «установка параметров». Приложения ИИ были полностью обучены и проверены на предыдущих этапах, поэтому этот этап адаптации относится к настройкам параметров для конкретных целей миссии, доступных ресурсов и условий окружающей среды. Эта адаптация должна быть сделана специалистами, работающими на стадии применения (военными операторами). Последний, четвертый этап – развертывание и использование полученной системы ИИ. Здесь основными заинтересованными сторонами являются две военные роли: оператор системы вооружений ИИ и контролирующий орган, занимающийся планированием и анализом операций. Компоненты ИИ системы действуют как помощь оператору оружия с возможностью явного объяснения, почему система сделала тот или иной вывод или нет.

Результаты

Архитектура четырех фаз описана более подробно ниже.

Фаза разработки. На рис. 1 показаны компоненты системы вооружения на основе ИИ на этапе разработки. Основным элементом является система хранения ИИ. Он содержит основу «морального поведения» и отвечает за объяснимость системы вооружения ИИ. С одной стороны, этот модуль определяет общий язык для всех участников, чтобы указать недвусмысленные правила взаимодействия, а также возможности системы в машиночитаемой и интерпретируемой человеком форме. Язык всегда состоит из грамматики и словаря. Поскольку системы ИИ будут широко использовать алгоритмы машинного обучения, используемые обучающие данные должны храниться централизованно в дополнение к моделям для классических подходов ИИ. Алгоритмы ИИ системы описаны в модуле приложения ИИ. В архитектуре определены четыре группы компонентов ИИ и механизм этических правил. Сенсорные приложения на основе ИИ для обнаружения, классификации, анализа интересующего объекта и вывода о поведении позволяют обнаруживать внешние критически важные обстоятельства. Управление ресурсами на основе ИИ позволяет оптимизировать использование ресурсов системы вооружения. Модули выводов и рассуждений обеспечат улучшенное понимание ситуации. Анализ целей и последствий должен соответствовать правилам боя с возможностями оружия. Эти четыре возможности полагаются на механизм этических правил, чтобы проверять свое поведение на соответствие к набору этических правил. Это гарантирует, что этические принципы используются для внедрения и выполнения компонентов ИИ в системе ИИ.

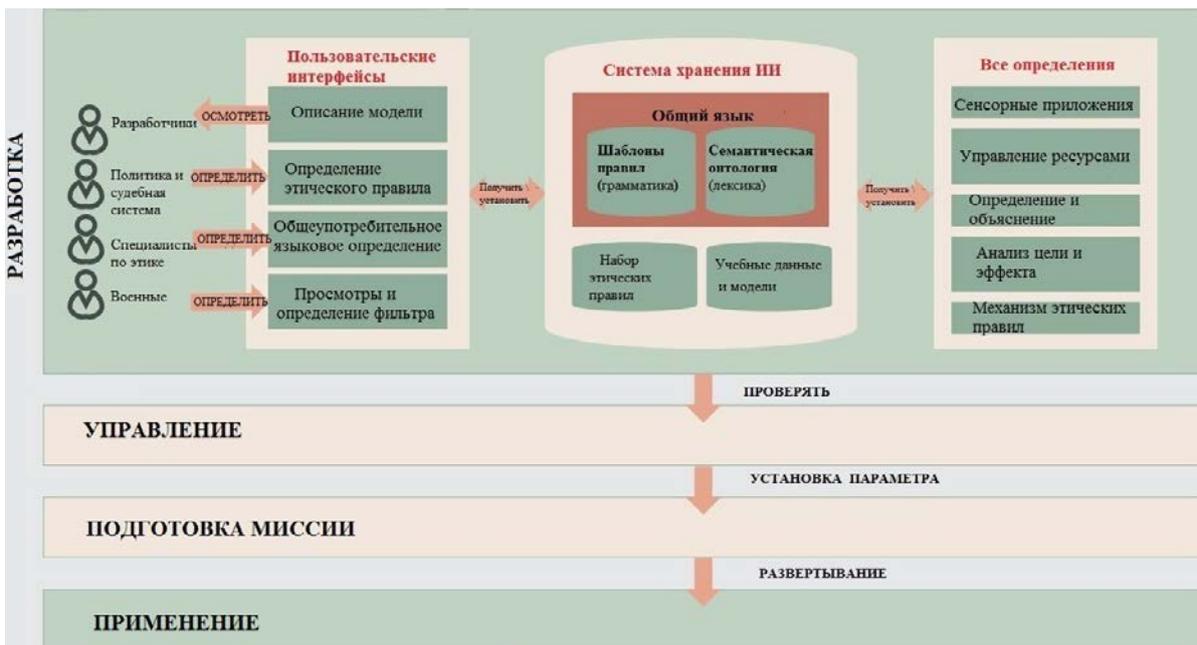


Рис. 1. Фаза разработки системы ответственного назначения на основе ИИ

Чтобы определить и изучить содержимое системы хранения ИИ, необходимы пользовательские интерфейсы. Для каждой группы участников должны быть доступны разные представления для ввода и изучения этических правил, определения общего языка и получения объяснений системных предложений с использованием технологии ХАИ (интерпретируемого ИИ). Адекватные процессы, методы и технологии для обеспечения надежности должны быть установлены на этапе разработки, что обеспечивает инженерная структура надежности. Такая структура может соответствовать инженерным подходам и руководящим принципам для систем с высокой степенью интеграции (например, техниками безопасности и стандартами безопасности) и должна охватывать всю фазу разработки. Конечным пунктом деятельности по разработке доверия является случай обеспечения доверия, всесторонняя аргументация надежности всей системы. Аргументация включает в себя все соответствующие требования надежности, а также достаточные доказательства, подтверждающие, что система отвечает всем этим требованиям.

Фаза управления. Следующим шагом после разработки является этап управления (рис. 2), на котором определяют элементы системы вооружения на основе ИИ, подлежащие квалификационной оценке.

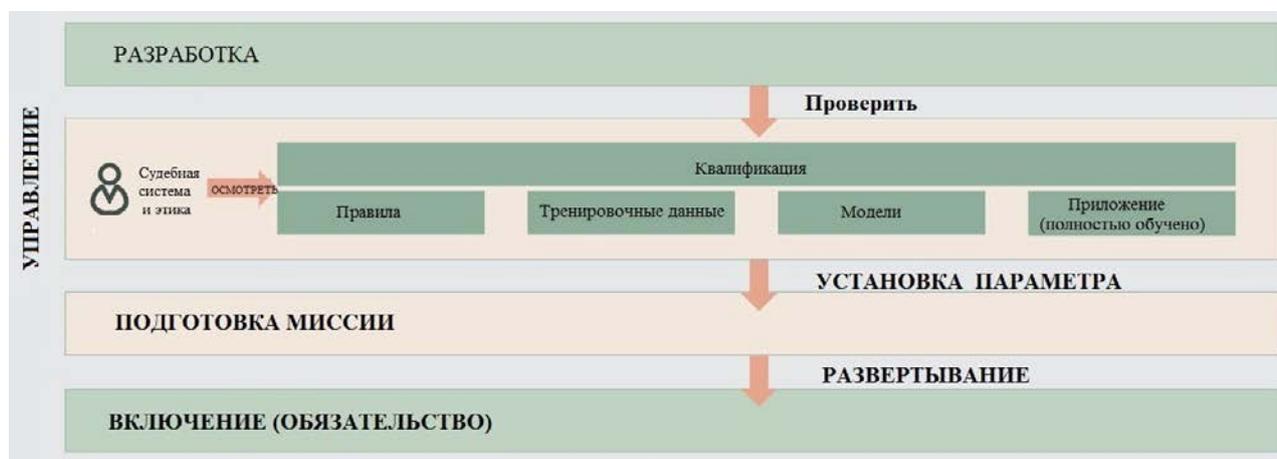


Рис. 2. Фаза управления системой на основе ИИ

Рассматриваемая система вооружения на основе ИИ на этом этапе полностью разработана, а это означает, что все части машинного обучения полностью обучены, а модели и правила стабилизированы. Результирующие алгоритмы являются статическими, но могут содержать параметры для конкретных настроек; это будет подробно описано в третьей фазе. Этот этап служит для проверки соблюдения правил применения и этических норм. Ключевым элементом этой проверки является случай обеспечения доверия, который обеспечивает общую аргументацию надежности, подкрепленную доказательствами и взаимосвязанную со всеми соответствующими артефактами разработки. Доказательства будут включать результаты тестов, но также будут и независимые тесты, проводимые квалификационными органами. Модули, подлежащие независимому тестированию, – это содержимое систем хранения ИИ (правила, тестовые и обучающие данные) и приложения ИИ с обработчиком правил.

Фаза подготовки миссии. Каждая военная миссия предъявляет уникальные требования к операциям, например, к миротворческой, гуманитарной или боевой миссии. На этапе подготовки миссии (рис. 3) цель миссии должна быть указана с использованием общего языка.

Настройка параметров для алгоритмов (например, условия окружающей среды) и корректировка системы правил (например, правила взаимодействия для конкретных задач, различные приоритеты) подготовят систему к участию в миссии. Генератор правил миссии устанавливает параметры для системы ИИ в соответствии с целью миссии. Это необходимо проверить, чтобы устранить ошибки и несоответствия между целью миссии, правилами и доступными ресурсами, которые можно использовать для достижения цели миссии. Общий шаблон параметризации должен быть адекватно отражен в случае гарантии доверия, чтобы гарантировать надежность в любом возможном контексте миссии.



Рис. 3. Фаза подготовки миссии

Фаза применения. Этот этап (рис. 4) охватывает использование системы ИИ в конкретной миссии. Адаптация для миссии (настройка параметров) и, таким образом, цель миссии и механизм правил инкапсулированы в набор данных правил для конкретной миссии. Основываясь на этом, пользователю помогают четыре модуля. Сенсорные приложения освобождают пользователя от обработки необработанных данных. Качество обнаружения, классификации и отслеживания результатов будет повышено за счет использования алгоритмов анализа данных, объединения выводов и рассуждений на основе ИИ. Интеллектуальное управление ресурсами поддерживает пользователя, оптимизируя потенциальные ресурсы оружия. Самым амбициозным подходом является помощь в анализе целей и результатов.

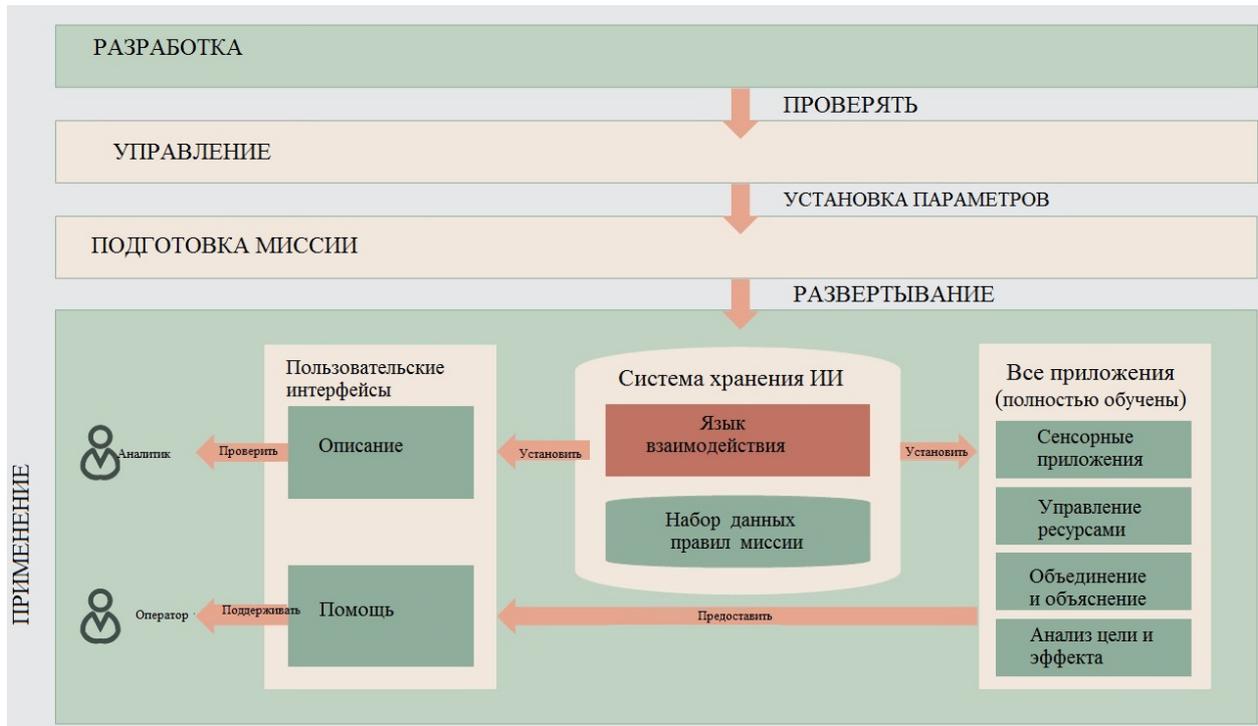


Рис. 4. Фаза применения

Помимо пользовательского интерфейса для оператора, который просто включает или отключает функции, должен быть специальный пользовательский интерфейс, поддерживающий проверку предложения ИИ, спрашивая, почему система сделала предложение применить оружие со специальной параметризацией или нет. Объяснения ИИ являются ключом к этому. С другой стороны, пользователь должен быть определенным образом обучен взаимодействию с системой. Скорее всего

(в зависимости от фактического применения) будут соответствующие предположения в случае обеспечения надежности, и тогда ключевым моментом является то, что предположения всегда остаются в силе.

Обсуждение

Динамичные сценарии, возникающие в областях ответственного применения, в том числе в военной, включают в себя сочетание классических элементов деятельности с атаками в кибер- и информационной сфере, а также с развертыванием большого количества автоматически и автономно управляемых беспилотных систем. Из-за значительно возросшей динамики этого боя также используется термин «реакция на скорости машины». Целью военных является достижение военного превосходства и способности планировать и проводить операции точнее и быстрее, чем противник. Однако в определенный момент времени люди больше не могут самостоятельно контролировать эту динамичную обстановку во всех ее деталях. Техническая поддержка в мониторинге и оценке ситуации, планировании действий и, наконец, выполнении операции станет необходимостью. Здесь в игру вступают методы искусственного интеллекта. Использование искусственного интеллекта предлагает возможность обеспечить оперативное превосходство, начиная с мониторинга и оценки ситуации. В связи с оцифровкой области деятельности будет доступно все больше информации для оценки ситуации. Методы распознавания образов могут привести к тому, что эти процессы будут выполняться намного быстрее и точнее. В сочетании с методами целеуказания, захвата цели и управления огнем цикл «датчик–стрелок» может быть значительно ускорен. Повышение точности воздействия может привести к уменьшению побочного ущерба и послужить защите гражданского населения. С помощью искусственного интеллекта будущие сражения можно проводить намного быстрее, точнее и с меньшими затратами [13]. Кроме того, такие технологии, как рои дронов, предлагают военный потенциал, который сегодня не существует в такой форме. Большой рой дронов – отличный пример, показывающий, что в какой-то момент с угрозой нельзя бороться, если в цепочке находится человек, который индивидуально выбирает цели для борьбы с ними. Эмерджентное поведение самоорганизующихся систем ИИ должно быть тщательно изучено, аналогично поведению естественного роя. Однако использование технологий из области искусственного интеллекта также сопряжено с рисками и проблемами. Во-первых, существуют риски, которые существуют и при использовании ИИ в менее ответственных областях, такие как вопросы честности и беспристрастности, необъяснимости или уязвимости перед манипуляциями и неправомерным использованием. Кроме того, особая проблема возникает в военной среде, когда технология ИИ используется в системах вооружения. Международное гуманитарное право определяет три важных принципа, которые необходимо учитывать при использовании оружия в конфликтах, кроме аспектов надежности и предосторожности. Это различие между гражданским населением и военными, соразмерность средств противостояния и оценка военной необходимости применения оружия. Это приводит к представлению о том, что люди должны иметь возможность осуществлять «эффективный контроль» при использовании оружия. Эффективный контроль здесь означает, что человек должен быть в состоянии понять и оценить всю ситуацию. Возникает вопрос, как обеспечить реальное осуществление эффективного контроля, какая информация должна быть доступна и как она должна быть представлена? Над всем этим стоит базовая потребность в доверии и, следовательно, концепция того, как установить надежность на всех уровнях этой очень сложной области применения.

Заключение

Концепция надежного ИИ в системах ответственного применения должна учитывать различные фазы (этапы) жизненного цикла системы вооружений с ИИ. Все этапы должны содержать меры для обеспечения надежности и ответственного использования ИИ. Ключевыми факторами использования ИИ являются общий язык, поставленная цель, анализ задач и последствий, а также гарантия надежности. В частности, модули на этапе управления (см. рис. 2) должны быть квалифицированы так же, как и система в целом. Правила должны быть проверены на правильность, обучающие данные на честный и реалистичный баланс, модели на правильность и уместность. Механизм правил должен быть протестирован на предмет обработки приоритетов и несоответствий.

Надежность – важное свойство для любой системы, а для тех, которые связаны со значительными рисками и тесно взаимодействуют с людьми-операторами, это особенно актуально. Однако из-за

неотъемлемых характеристик компонентов ИИ, особенно когда речь идет о машинном обучении, сложно обеспечить достоверность, особенно полную понятность. Более того, надежность касается не только технических свойств отдельных компонентов ИИ, но и свойств всей системы в ее общем контексте.

Надежные системы ответственного назначения с ИИ:

- должны быть законными, соответствовать всем применимым законам и правилам;
- должны быть этичными, обеспечивая соблюдение этических принципов и ценностей;
- должны быть надежными как с технической, так и с социальной точек зрения, поскольку даже при наличии добрых намерений системы ИИ могут нанести непреднамеренный вред.

Надежность, включающая в себя такие аспекты, как безопасность и защищенность, является более техническим аспектом, который в настоящее время также характеризуется многими проблемами. Изложенное должно послужить стимулом для разработчиков систем ответственного назначения, занимающихся вопросами обеспечения качества принимаемых решений [14, 15].

Список литературы

1. Rise of artificial intelligence in military weapons systems / ed. by J. Beyerer, P. Martini. Fraunhofer Group for Defense and Security VVS, 2020. URL: www.vvs.fraunhofer.de
2. Boulanin V., Saalman L., Topychkanov P. et al. Artificial Intelligence, Strategic Stability and Nuclear Risk. 2020. URL: https://www.sipri.org/sites/default/files/2020-06/artificial_intelligence_strategic_stability_and_nuclear_risk.pdf
3. Integrating Cybersecurity and Critical Infrastructure. National, Regional and International Approaches / ed. by L. Saalman. 2018. URL: https://www.sipri.org/sites/default/files/2018-04/integrating_cybersecurity_0.pdf
4. The Impact of Artificial Intelligence on Strategic Stability and Nuclear Risk. Vol. I. Euro-Atlantic Perspectives / ed. by V. Boulanin. 2020. URL: <https://www.sipri.org/publications/2020/other-publications/artificial-intelligence-strategic-stability-and-nuclear-risk>
5. Boulanin V., Verbruggen M. Mapping the Development of Autonomy in Weapon Systems. 2020. URL: https://www.sipri.org/sites/default/files/2018-04/integrating_cybersecurity_0.pdf
6. Boulanin V., Bruun L., Goussac N. Autonomous Weapon Systems And International Humanitarian Law. Identifying Limits and the Required Type and Degree of Human–Machine Interaction. 2021. URL: https://www.sipri.org/sites/default/files/2021-06/2106_aws_and_ihl_0.pdf
7. Saalman L., Su F., Saveleva Dovgal L. Cyber Posture Trends in China, Russia, the United States and the European Union. 2022. URL: https://www.sipri.org/sites/default/files/2022-12/2212_cyber_postures_0.pdf
8. Boulanin V. Mapping the development of autonomy in weapon systems. A primer on autonomy. 2017. URL: <https://www.sipri.org/sites/default/files/Mapping-development-autonomy-in-weapon-systems.pdf>
9. Boulanin V., Goussac N., Bruun L., Richards L. Responsible Military Use of Artificial Intelligence. Can the European Union Lead the Way in Developing Best Practice? 2020. URL: <https://www.sipri.org/publications/2020/other-publications/responsible-military-use-artificial-intelligence-can-european-union-lead-way-developing-best>
10. Boulanin V., Brockmann K., Richards L. Responsible Artificial Intelligence Research and Innovation for International Peace and Security. 2020. URL: https://www.sipri.org/sites/default/files/2020-11/sipri_report_responsible_artificial_intelligence_research_and_innovation_for_international_peace_and_security_2011.pdf
11. Bromley M., Maletta G. The Challenge of Software and Technology Transfers to Non-Proliferation Efforts // Implementing and Complying with Export Controls. 2018. URL: <https://www.sipri.org/publications/2018/other-publications/challenge-software-and-technology-transfers-non-proliferation-efforts-implementing-and-complying>
12. Turell J., Su F., Boulanin V. Cyber-incident Management Identifying and Dealing with the Risk of Escalation // IPRI Policy. 2020. № 55. URL: <https://www.sipri.org/publications/2020/sipri-policy-papers/cyber-incident-management-identifying-and-dealing-risk-escalation>
13. Бабкин А. В., Подольский А. Г., Прокофьев О. В., Савочкин А. Е. Роль информационно-аналитической системы мониторинга цен в влиянии на научную и научно-техническую продукцию военного назначения в обеспечении экономической безопасности государства // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 4. С. 110–119.
14. Михеев М. Ю., Прокофьев О. В., Семочкина И. Ю. Методологии построения систем поддержки принятия решений в многоаспектной области применения // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2022. Т. 1. С. 18–22.
15. Иванов А. И., Кубасов И. А. Сильный искусственный интеллект: повышение качества нейросетевых решений с переходом к обработке входных данных большого объема // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 1. С. 9–16. doi: 10.21685/2307-4205-2021-1

References

1. Beyerer J., Martini P. (ed.). *Rise of artificial intelligence in military weapons systems*. Fraunhofer Group for Defense and Security VVS, 2020. Available at: www.vvs.fraunhofer.de

2. Boulanin V., Saalman L., Topychkanov P. et al. *Artificial Intelligence, Strategic Stability and Nuclear Risk*. 2020. Available at: https://www.sipri.org/sites/default/files/2020-06/artificial_intelligence_strategic_stability_and_nuclear_risk.pdf
3. Saalman L. (ed.). *Integrating Cybersecurity and Critical Infrastructure. National, Regional and International Approaches*. 2018. Available at: https://www.sipri.org/sites/default/files/2018-04/integrating_cybersecurity_0.pdf
4. Boulanin V. (ed.). *The Impact of Artificial Intelligence on Strategic Stability and Nuclear Risk. Vol. I. Euro-Atlantic Perspectives*. 2020. Available at: <https://www.sipri.org/publications/2020/other-publications/artificial-intelligence-strategic-stability-and-nuclear-risk>
5. Boulanin V., Verbruggen M. *Mapping the Development of Autonomy in Weapon Systems*. 2020. Available at: https://www.sipri.org/sites/default/files/2018-04/integrating_cybersecurity_0.pdf
6. Boulanin V., Bruun L., Goussac N. *Autonomous Weapon Systems And International Humanitarian Law. Identifying Limits and the Required Type and Degree of Human–Machine Interaction*. 2021. Available at: https://www.sipri.org/sites/default/files/2021-06/2106_aws_and_ihl_0.pdf
7. Saalman L., Su F., Saveleva Dovgal L. *Cyber Posture Trends in China, Russia, the United States and the European Union*. 2022. Available at: https://www.sipri.org/sites/default/files/2022-12/2212_cyber_postures_0.pdf
8. Boulanin V. *Mapping the development of autonomy in weapon systems. A primer on autonomy*. 2017. Available at: <https://www.sipri.org/sites/default/files/Mapping-development-autonomy-in-weapon-systems.pdf>
9. Boulanin V., Goussac N., Bruun L., Richards L. *Responsible Military Use of Artificial Intelligence. Can the European Union Lead the Way in Developing Best Practice?* 2020. Available at: <https://www.sipri.org/publications/2020/other-publications/responsible-military-use-artificial-intelligence-can-european-union-lead-way-developing-best>
10. Boulanin V., Brockmann K., Richards L. *Responsible Artificial Intelligence Research and Innovation for International Peace and Security*. 2020. Available at: https://www.sipri.org/sites/default/files/2020-11/sipri_report_responsible_artificial_intelligence_research_and_innovation_for_international_peace_and_security_2011.pdf
11. Bromley M., Maletta G. The Challenge of Software and Technology Transfers to Non-Proliferation Efforts. *Implementing and Complying with Export Controls*. 2018. Available at: <https://www.sipri.org/publications/2018/other-publications/challenge-software-and-technology-transfers-non-proliferation-efforts-implementing-and-complying>
12. Turell J., Su F., Boulanin V. Cyber-incident Management Identifying and Dealing with the Risk of Escalation. *IPRI Policy*. 2020;(55). Available at: <https://www.sipri.org/publications/2020/sipri-policy-papers/cyber-incident-management-identifying-and-dealing-risk-escalation>
13. Babkin A.V., Podol'skiy A.G., Prokof'ev O.V., Savochkin A.E. The role of the information and analytical price monitoring system in influencing scientific and scientific-technical military products in ensuring the economic security of the state. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(4):110–119. (In Russ.)
14. Mikheev M.Yu., Prokof'ev O.V., Semochkina I.Yu. Methodologies for building decision support systems in a multidimensional field of application. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2022;1:18–22. (In Russ.)
15. Ivanov A.I., Kubasov I.A. Strong artificial intelligence: improving the quality of neural network solutions with the transition to processing large-volume input data. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(1):9–16. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2021-1-1

Информация об авторах / Information about the authors

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

Олег Владимирович Прокофьев

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

Mikhail Yu. Mikheev

Doctor of technical sciences, professor, head of the sub-department of information technology and systems, Penza State Technological University (1a / 11 Baidukova passage/ Gagarina street, Penza, Russia)

Oleg V. Prokofiev

Candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the sub-department of information technology and systems, Penza State Technological University (1a / 11 Baidukova passage/ Gagarina street, Penza, Russia)

Александр Евгеньевич Савочкин

кандидат технических наук,
доцент кафедры прикладной информатики,
Пензенский государственный
технологический университет
(Россия, г. Пенза, проезд Байдукова/
ул. Гагарина, 1а/11)
E-mail: aebrat@mail.ru

Ирина Юриевна Семочкина

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

Aleksandr E. Savochkin

Candidate of technical sciences, associate professor
of the sub-department of applied informatics,
Penza State Technological University
(1a / 11 Baidukova passage/ Gagarina street,
Penza, Russia)

Irina Yu. Semochkina

Candidate of technical sciences, associate professor,
associate professor of the sub-department
of information technology and systems,
Penza State Technological University
(1a / 11 Baidukova passage/ Gagarina street,
Penza, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 15.06.2023

Поступила после рецензирования/Revised 17.07.2023

Принята к публикации/Accepted 14.08.2023

ФЕНОМЕН «ЖИВУЧЕСТЬ» В ЗАДАЧАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ СЛОЖНЫХ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

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.* XX в. привел человечество к решению многих новых проблем, которые характеризуются появлением структурно и функционально сложных систем (СФСС), что потребовало появления задач обеспечения их высокой надежности и безотказности. Из опыта применения СФСС по назначению в течение всего жизненного цикла к началу XXI в. был выявлен ряд важных недостатков: отличие фактического уровня надежности конструктивных элементов от нормативных требований; вычисляемая стоимость работ, выполняемых на СФСС во время их эксплуатации для обеспечения ресурса и надежности; недостаточная эффективность работ, выполняемых на СФСС для обеспечения ресурса и надежности; невозможность во многих случаях правильно диагностировать повреждения оборудования во время эксплуатации; отсутствие единой логически обоснованной системы нормативных документов; отсутствие единой научной методологии обеспечения прочности, ресурса, надежности и безопасности СФСС; отсутствие централизованной системы управления работами по обеспечению качества СФСС, негативное влияние человеческого фактора. Вся семья изучаемых факторов потребовала применения основ системной концепции обеспечения высокого качества СФСС. Данная статья и посвящена решению ряда вышеперечисленных задач. *Материалы и методы.* Для решения многих проблем авторами статьи предлагается применение следующих подходов и теоретических методов: комплексного использования методов термодинамики, теории оператора функционального анализа и статистического моделирования, теории асимметрии внутреннего времени критически важных СФСС с длительными сроками активного существования. *Результаты и выводы.* Получены новые результаты применения современного функционального анализа и оценки асимметрии внутреннего времени.

Ключевые слова: исходный ресурс, остаточный ресурс, повреждаемость, зарождение дефектов, долговечность, живучесть, внутреннее время

Для цитирования: Острейковский В. А., Сорочкин А. В. Феномен «живучесть» в задачах обеспечения надежности сложных критически важных динамических систем // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 21–27. doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-3

THE PHENOMENON OF «SURVIVABILITY» IN PROBLEMS OF ENSURING RELIABILITY OF COMPLEX CRITICAL DYNAMIC SYSTEMS

V.A. Ostreykovskiy¹, A.V. Sorochkin²

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

Abstract. *Background.* The XX century has led mankind to solve many new problems, which are characterized by the appearance of structurally and functionally complex systems (SFSS), which required the emergence of tasks to ensure their high reliability and reliability. From the experience of using SFSS for its intended purpose throughout the entire life cycle, by the beginning of the XXI century, a number of important shortcomings were identified: the difference between the actual level of reliability of structural elements and regulatory requirements; calculating the cost of work performed on the SFSS during their operation to ensure resource and reliability; insufficient efficiency of the work performed at the SFSS to ensure resource and reliability; the inability in many cases to correctly diagnose equipment damage during operation; the absence of a single logically sound system of regulatory documents; the lack of a unified scientific methodology for ensuring the strength, resource, reliability and safety of SFSS; the lack of a centralized management system for the quality assurance of SFSS, the negative impact of the human factor. The whole family of factors under study required the application of the fundamentals of the system concept of ensuring high quality of SFSS. This article is devoted to solving a number of the above tasks. *Materials and methods.* To solve many problems, the authors

of the article propose the use of the following approaches and theoretical methods: the integrated use of thermodynamics methods, the operator theory of functional analysis and statistical modeling, the theory of internal time asymmetry of critical SPSS with long periods of active existence. *Results and conclusions.* New results of the application of modern functional analysis and evaluation of the asymmetry of internal time are obtained.

Keywords: initial resource, residual resource, damage, origin of defects, durability, survivability, internal time

For citation: Ostreykovskiy V.A., Sorochkin A.V. The phenomenon of «survivability» in problems of ensuring reliability of complex critical dynamic systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(3): 21–27. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-3

Введение

В многотомной монографии «Исследования напряжений и прочности ядерных реакторов» Института машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН) 1987–2009 г. были опубликованы результаты фундаментальных и прикладных исследований в области прочности, ресурса и безопасности водо-водяных энергетических установок (ВВЭР) атомных электростанций (АЭС)¹.

Это позволило создать научно-техническую базу увеличения проектного срока службы основного оборудования реакторных установок без необходимости его замены в течение 60 лет, а также осуществить проекты АЭС с ВВЭР четвертого и пятого поколения с ресурсами 80–100 лет по критериям надежности и безопасности.

В дополнение к отмеченному выше необходимо подчеркнуть, что в конце XX в. также проводились исследования в области живучести информационно-вычислительных и управляющих систем [1].

Таким образом, исследования обеспечения живучести сложных технических компонентов являются чрезвычайно актуальными для нашего времени. Но при этом нельзя не отметить тот факт, что до настоящего времени в нашей стране только в период с 1983 по 2022 г. было выпущено в области надежности около 40 ГОСТов, и среди них нет ни одного, посвященного оценке такого важного свойства, как «живучесть» структурно и функционально сложных систем. И это выглядит очень странным фактом в науке о надежности и безопасности.

Общие положения

В соответствии с мнением Академии наук РФ под «живучестью» понимается свойство системы, состоящее (в отличие от свойства «долговечности») в ее способности противостоять крупным возмущениям за пределами, установленными для их штатного функционирования, не допуская последующего каскадного развития аварийных и катастрофических ситуаций.

Обеспечение живучести достигается в рамках комплексных методологий по повышению безопасности путем создания барьеров безопасности, эшелонированной защиты, систем ликвидации последствий аварийных ситуаций, систем штатной и оперативной диагностики и мониторинга.

Живучесть, как и долговечность, закладывается на стадии проектирования систем, обеспечивается на стадии изготовления и поддерживается на стадии эксплуатации.

Также известно, что влияющим на качественные показатели живучести одним из главных факторов является трещиностойкость конструкционных материалов оборудования сложных систем [2–9]. В этих авторитетных источниках на начало XXI в. утверждается, что достигнутый к этому сроку уровень надежности и безотказности в атомной энергетике (АЭС) имел следующие недостатки:

- 1) отличие фактического уровня надежности элементной базы оборудования от нормативных требований;
- 2) высокая стоимость работ, выполняемых на АЭС во время их эксплуатации для обеспечения требуемой долговечности и надежности;
- 3) недостаточная эффективность работ, выполняемых на АЭС для обеспечения долговечности (ресурс) и надежности;
- 4) при выполнении работ невозможно во многих случаях диагностировать причины повреждения оборудования во время эксплуатации;
- 5) отсутствие единой логически обоснованной системы нормативной документации и единого логически обоснованного плана их разработки или усовершенствования;

¹ ГОСТ 27.102–2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения.

6) отсутствие единой научной методологии обеспечения прочности, ресурса, надежности и безопасности АЭС;

7) отсутствие централизованной отраслевой системы управления работами в области, указанной в п.6, негативное влияние человеческого фактора и отсутствие единой обоснованной программы повышения квалификации, неполная информационная обеспеченность работ.

В целях устранения отмеченных недостатков в начале XXI в. в РФ была разработана «Системная концепция обеспечения прочности, ресурса, надежности и безопасности оборудования и трубопроводов АЭС» [10]. Эта концепция имеет в своей основе принципы системного подхода и системной методологии [2].

Характеристика показателей живучести структурно и функционально сложных систем

Живучесть как одна из важнейших характеристик сложных высоко ответственных и критически важных систем тесно связана с понятием техногенной безопасности. Техногенная безопасность оценивается по характеристикам надежности, прочности и ресурса технических систем. При этом обобщенным показателем – критерием техногенной безопасности – является понятие риска возникновения техногенных аварий и катастроф и математическое ожидание ущерба от них.

Фундаментальной основой определения показателей живучести является критерий трещиностойкости критических элементов оборудования структурно и функционально сложных систем (СФСС). Критерий трещиностойкости оборудования СФСС рассчитывается по критической температуре и коэффициентам интенсивности напряжений или деформации расчетным путем, а также по результатам испытаний стандартных лабораторных образцов с трещинами на растяжение и ударную вязкость моделей, узлов или натуральных элементов конструкций при однократном нагружении (с учетом конструктивных норм штатных изделий, материалов и технологии изготовления, типа циклов нагруженности в эксплуатации, температуры и времени) [2, с. 314–315].

Таким образом, свойство живучести тесно связано со свойством трещиностойкости конструкционных материалов оборудования СФСС. Как показано в работе [2, с. 308–319], в соответствии с системной концепцией обеспечения прочности, надежности и безопасности оборудования и трубопроводов АЭС [2] основной «исходной зависимостью для упрощенного расчета развития трещины при штатных режимах от исходных дефектов является степенная зависимость скорости роста трещины $\frac{dt}{dN}$ от размаха коэффициента интенсивности напряжений ΔK_i при пульсирующем цикле нагружения для области циклического нагружения при числе нагрузок $10^4 < N < 10^7$:

$$\frac{dt}{dN} = C(\Delta K_i)^n, \quad (1)$$

где C и n – постоянные, зависящие от свойств материала и условий нагруженности, определяемые в экспериментах на образцах с трещинами.

Так, при отсутствии прямых экспериментальных данных значений C и n принимаются равными: для малоуглеродистых сталей 2,7 и $1,6 \cdot 10^{-8}$, для низколегированных сталей 2,9 и $8,5 \cdot 10^{-9}$, для аустенитных нержавеющей сталей 3,5 и $5,4 \cdot 10^{-10}$ соответственно [2, с. 357].

Величины C и n при уточненных расчетах имеют вид

$$n = \frac{\left\{ 4 - [1 - m(I)] \left[I - \frac{\Delta\sigma_{np}}{2\sigma_{0,2}} \right] \right\}}{[I - mI]} \quad (2)$$

и

$$C = \frac{I}{\left(\frac{I}{e_r} \ln \frac{I}{I - \Psi_{1,2}} \right)}, \quad (3)$$

где $\Delta\sigma_{\text{пр}}$ – размах приведенных напряжений, равный $(\sigma_{\text{max}})_{\text{пр}} - (\sigma_{\text{min}})_{\text{пр}}$, находящихся на уровне $2\sigma_{0,2}$; $m(I)$ – показатель упрочнения в первом полцикле ($K = 1$); e_r – деформация предела текучести $\left(e_r = \frac{\sigma_r}{E} \right)$; $\Psi_{1,2}$ – относительное сужение в шейке разорванного образца [11].

Для случая заданной асимметрии цикла (при положительных значениях σ_r) расчет может быть осуществлен по зависимостям вида [2, с. 357]

$$\frac{dt}{dN} = \frac{C_1 (\Delta K)^n}{(1 - r_\sigma K_C - \Delta K_i)} \quad (4)$$

Так как повреждаемости систем описываются статистическими распределениями и вероятность зарождения дефекта равна

$$P_3 = P(a_n \geq 1), \quad (5)$$

то полная вероятность разрушения системы из-за сквозных дефектов или крупномасштабного разрушения равна

$$P(\tau_1) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - P^i(\tau_1)), \quad (6)$$

где N – число элементов в структурной модели системы.

Для определения вероятности разрушения конструкции системы рекомендуется пользоваться методами механики разрушения и должны быть определены следующие вероятности¹:

- условные вероятности образования сквозного дефекта и крупномасштабного разрушения от одного дефекта в элементе при условии возникновения расчетного события PC_R в момент времени τ_1 ;
- вероятности образования сквозных дефектов и крупномасштабного разрушения от нескольких дефектов в элементе с учетом вероятностей возникновения расчетных событий;
- полные вероятности образования сквозных дефектов и крупномасштабного разрушения в конструкции.

Предполагается анализ образования сквозных дефектов. Рассмотрение трех причин их возникновения:

- 1) коррозионно-механическое зарождение новых дефектов;
- 2) коррозионно-усталостный рост поверхностных и подповерхностных дефектов;
- 3) критический рост поверхностных и подповерхностных дефектов.

Модели безотказности и долговечности в теории надежности сложных систем с учетом свойств живучести

Для определения количественных значений показателей надежности в соответствии с выражением (6) необходимы значения функций распределения времени до отказа $F_N^i(\tau)$ до перехода в предельное состояние $F_{\Pi}^i(\tau)$.

Так, для определения показателей свойств безотказности и ремонтпригодности:

$$F_N^i(\tau) = P_T^i \left[\ell^i(\tau) \leq \ell_{\text{рем}}^i \right] + P_{\text{ист}}^i \left[a^i(\tau) > a_{\text{рем}}^i \right] \times \left\{ 1 - P_T^i \left[\ell^i(\tau) \leq \ell_{\text{рем}}^i \right] \right\}, \quad (7)$$

где $P_T^i \left[\ell^i(\tau) \leq \ell_{\text{рем}}^i \right]$ – вероятность, определяемая с использованием формул, описывающих образования устойчивых сквозных дефектов в i -м элементе, которые могут быть отремонтированы.

¹ ГОСТ 27.102–2021. Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения.

А для определения показателей долговечности используется функция распределения времени до перехода в предельное состояние $F_{\Pi}(\tau)$:

$$F_N^i(\tau) = P_{\text{КР}}^i(\tau) + P_T^i[\ell^i(\tau) > \ell_{\text{рем}}^i] \cdot [1 - P_{\text{КР}}^i(\tau)], \quad (8)$$

где $P_T^i[\ell^i(\tau) > \ell_{\text{рем}}^i]$ – вероятность, определяемая с использованием формул в i -м элементе, которые не могут быть отремонтированы; $P_{\text{КР}}^i(\tau)$ – вероятность крупномасштабного разрушения в i -м элементе, определяемая по формуле

$$P^i(\tau) = \sum_{i=1}^{N_{\text{РС}}} \frac{P^i}{PC(\tau_1) P_{PC_K}}, \quad (9)$$

где $N_{\text{РС}}$ – число расчетных событий PC_K .

Теперь, зная аналитические выражения для функций распределения времени для определения вероятности безотказной работы и до перехода в предельное состояние, можно определить значения соответствующих интенсивностей отказов анализируемых систем $\lambda_N^i(\tau)$ и $\lambda_{\Pi}^i(\tau)$:

$$\lambda_N^i(\tau) = \frac{dF_N^i}{d\tau} / [1 - F_N^i(\tau)] \quad (10)$$

и

$$\lambda_{\Pi}^i(\tau) = \frac{dF_{\Pi}^i}{d\tau} / [1 - F_{\Pi}^i(\tau)]. \quad (11)$$

При этом структура исследуемых систем обычно представляется в виде последовательного соединения элементов, для которых определяются интенсивности отказов (10) и переходов в предельное состояние (11). Тогда в соответствии с требованиями ГОСТа показатели безотказности, долговечности и готовности оборудования СФСС определяются по формулам для расчета показателей надежности оборудования СФСС.

Заключение

Из содержания статьи целесообразно сделать следующие выводы:

1. Трещиностойкость конструкционных материалов оборудования СФСС является одним из главных факторов, влияющих на качественные показатели живучести.

Основные недостатки в атомной энергетике на начало XXI в.:

а) отличие фактического уровня надежности элементной базы оборудования от нормативных требований;

б) высокая стоимость работ, выполняемых на АЭС во время их эксплуатации для обеспечения требуемой долговечности и надежности;

в) недостаточная эффективность работ, выполняемых на АЭС для обеспечения долговечности (ресурс) и надежности;

г) при выполнении работ невозможно во многих случаях диагностировать причины повреждения оборудования во время эксплуатации;

д) отсутствие единой логически обоснованной системы нормативной документации и единого логически обоснованного плана их разработки или усовершенствования;

е) отсутствие единой научной методологии обеспечения прочности, ресурса, надежности и безопасности АЭС;

ж) отсутствие централизованной отраслевой системы управления работами в области, указанной в п.б, негативное влияние человеческого фактора и отсутствие единой обоснованной программы повышения квалификации, неполная информационная обеспеченность работ [12].

2. Фундаментальной основой определения показателей живучести является критерий трещиностойкости критических элементов оборудования СФСС, который влияет на вероятность зарождения сквозных дефектов, основными причинами возникновения которых являются:

- а) коррозионно-механическое зарождение новых дефектов;
- б) коррозионно-усталостный рост поверхностных и подповерхностных дефектов;
- в) критический рост поверхностных и подповерхностных дефектов.

3. При расчете количественных значений показателей надежности СФСС система представляется в виде последовательного соединения элементов, для которых определяются:

- интенсивности отказов;
- интенсивности переходов в предельное состояние.

Список литературы

1. Живучесть и реконфигурация информационно-вычислительных систем. Вып. 1. Теоретические основы живучести : сб. тез. докл. Второй Всесоюзной науч.-техн. конф. М., 1988. 218 с.
2. Махутов Н. А., Фролов В. К., Драгунов Ю. Г. [и др.]. Исследования напряжений и прочности ядерных реакторов. Анализ риска и повышение безопасности водо-водяных энергетических реакторов / под ред. Н. А. Махутова и М. М. Гадниной. М. : Наука, 2009. 499 с.
3. Гетман А. Ф. Ресурс эксплуатации оборудования и трубопроводов АЭС. М. : Энергоатомиздат, 2000.
4. Аркадов Г. В., Гетман А. Ф., Родионов А. Н. Надежность оборудования и трубопроводов АЭС и оптимизация их жизненного цикла (вероятностные методы). М. : Энергоатомиздат, 2010. 424 с.
5. Антонов А. В., Острейковский В. А. Ресурс и срок службы оборудования энергоблоков атомных станций: на примере энергоблоков Смоленской АЭС. М. : Инновац. машиностроение, 2017. 536 с.
6. Острейковский В. А., Денисова Т. Ю., Шевченко Е. Н. Асимметрия времени в теории прогнозирования состояния динамических систем : монография. Сургут : Печатный мир, 2018. 574 с.
7. Острейковский В. А. Анализ устойчивости и управляемости динамических систем методами теории катастроф. М. : Высш. шк., 2004. 312 с.
8. Острейковский В. А., Швыряев Ю. В. Безопасность атомных станций. Вероятностный анализ. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2008.
9. Дьяков А. Ф., Канцдалов В. Г., Балтян В. Н. [и др.]. Техногенные катастрофы в тепловой и атомной энергетике: Прочностной анализ. Инженерная психология. Новые технологии их предотвращения. М. : Инновационное машиностроение, 2016. Т. 4. 616 с.
10. Руководящий документ СК-1-2005 «Системная концепция обеспечения прочности, ресурса, надежности и безопасности оборудования и трубопроводов АЭС». М. : КЦН БРАС, 2004.
11. Панкин А. М. Основные вопросы методологии диагностирования сложных технических объектов // Надежность и качество сложных систем. 2021. № 2. С. 62–69. doi: 10.21685/2307-4205-2021-2-6
12. Северцев Н. А., Дарьина А. Н. Применение критериев подобия при ресурсной отработке сложных технических систем и изделий // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 4. С. 5–14. doi: 10.21685/2307-4205-2020-4-1

References

1. *Zhivuchest' i rekonfiguratsiya informatsionno-vychislitel'nykh sistem. Vyp. 1. Teoreticheskie osnovy zhivuchesti: sb. tez. dokl. Vtoroy Vsesoyuznoy nauch.-tekhn. konf. = Survivability and reconfiguration of information and computing systems. Issue 1. Theoretical foundations of survivability: a collection of abstracts of the Second All-Union scientific and technical conference.* Moscow, 1988:218. (In Russ.)
2. *Makhutov N.A., Frolov V.K., Dragunov Yu.G. et al. Issledovaniya napryazheniy i prochnosti yadernykh reaktorov. Analiz riska i povyshenie bezopasnosti vodo-vodyanykh energeticheskikh reaktorov = Stress and strength studies of nuclear reactors. Risk analysis and improving the safety of water-water power reactors.* Moscow: Nauka, 2009:499. (In Russ.)
3. *Getman A.F. Resurs ekspluatatsii oborudovaniya i truboprovodov AES = Resource of NPP equipment and pipelines operation.* Moscow: Energoatomizdat, 2000. (In Russ.)
4. *Arkadov G.V., Getman A.F., Rodionov A.N. Nadezhnost' oborudovaniya i truboprovodov AES i optimizatsiya ikh zhiznennogo tsikla (veroyatnostnye metody) = Reliability of NPP equipment and pipelines and optimization of their life cycle (probabilistic methods).* Moscow: Energoatomizdat, 2010:424. (In Russ.)
5. *Antonov A.V., Ostreykovskiy V.A. Resurs i srok sluzhby oborudovaniya energoblokov atomnykh stantsiy: na primere energoblokov Smolenskoj AES = Resource and service life of nuclear power plant power units equipment: on the example of Smolensk NPP power units.* Moscow: Innovats. mashinostroenie, 2017:536. (In Russ.)

6. Ostreykovskiy V.A., Denisova T.Yu., Shevchenko E.N. *Asimetriya vremeni v teorii prognozirovaniya sostoyaniya dinamicheskikh sistem: monografiya = Time asymmetry in the theory of predicting the state of dynamic systems : monograph*. Surgut: Pechatnyy mir, 2018:574. (In Russ.)
7. Ostreykovskiy V.A. *Analiz ustoychivosti i upravlyaemosti dinamicheskikh sistem metodami teorii katastrof = Analysis of stability and controllability of dynamic systems by methods of the theory of catastrophes*. Moscow: Vyssh. shk., 2004:312. (In Russ.)
8. Ostreykovskiy V.A., Shvyryaev Yu.V. *Bezopasnost' atomnykh stantsiy. Veroyatnostnyy analiz = Safety of nuclear power plants. Probabilistic analysis*. Moscow: FIZMATLIT, 2008. (In Russ.)
9. D'yakov A.F., Kantsedalov V.G., Baltyan V.N. et al. *Tekhnogennye katastrofy v teplovoy i atomnoy energetike: Prochnostnyy analiz. Inzhenernaya psikhologiya. Novye tekhnologii ikh predotvrashcheniya = Technogenic catastrophes in thermal and nuclear power: Strength analysis. Engineering psychology. New technologies for their prevention*. Moscow: Innovatsionnoe mashinostroenie, 2016;4:616. (In Russ.)
10. *Rukovodyashchiy dokument SK-I-2005 «Sistemnaya kontseptsiya obespecheniya prochnosti, resursa, nadezhnosti i bezopasnosti oborudovaniya i truboprovodov AES» = Guidance document SK-I-2005 "System concept of ensuring the strength, resource, reliability and safety of NPP equipment and pipelines"*. Moscow: KTsN BRAS, 2004. (In Russ.)
11. Pankin A.M. Basic issues of methodology for diagnosing complex technical objects. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2021;(2):62–69. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2021-2-6
12. Severtsev N.A., Dar'ina A.N. Application of similarity criteria in resource testing of complex technical systems and products. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(4):5–14. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2020-4-1

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, пр-т Ленина, 1)
 E-mail: academicostr@yandex.ru

Андрей Викторович Сорочкин
 аспирант,
 Сургутский государственный университет
 (Россия, г. Сургут, пр-т Ленина, 1)
 E-mail: sorochkin_av@surgu.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)

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 10.05.2023

Поступила после рецензирования / Revised 13.06.2023

Принята к публикации / Accepted 11.07.2023

КАЧЕСТВО И НАДЕЖНОСТЬ ЭНЕРГОСИСТЕМ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Т. В. Бойкова¹, А. С. Григорьев², Д. В. Маколкин³, С. А. Королев⁴, И. А. Тутнов⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия
^{1, 2, 3, 4} nrcki@nrcki.ru, ⁵ andt@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В труднодоступных районах РФ заметные риски энергетической безопасности автономных агломераций и промышленных зон требуют внимания к вопросам надежности, противоаварийной устойчивости локальных энергосистем малой мощности. *Материалы и методы.* Представлен методологический алгоритм оценки качества различных топологических решений для локальных энергосистем с установками генерации малой электрической мощности. *Результаты и выводы.* В основе алгоритма – имитационное моделирование возможных аварийных событий, повреждений и отказов в работе линий электропередач.

Ключевые слова: моделирование, надежность, риск, отказоустойчивость, энергетическая безопасность, распределенная энергосистема, потребитель

Для цитирования: Бойкова Т. В., Григорьев А. С., Маколкин Д. В., Королев С. А., Тутнов И. А. Качество и надежность энергосистем малой мощности // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 28–37. doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-4

QUALITY AND RELIABILITY OF LOW-POWER POWER SYSTEMS

T.V. Boykova¹, A.S. Grigoriev², D.V. Makolkin³, S.A. Korolev⁴, I.A. Tutnov⁵

^{1, 2, 3, 4, 5} National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia
^{1, 2, 3, 4} nrcki@nrcki.ru, ⁵ andt@mail.ru

Abstract. *Background.* The problem of dependability and emergency stability of local low-power systems require attention due to the risks of energy safety for autonomous agglomerations. This attention is especially important for hard-to-reach territories of the Russian Federation. *Materials and methods.* The article presents an algorithm for assessing the quality of various projects of local power systems with low-power generation plants. *Results and conclusions.* The algorithm is based on simulation modeling of possible emergency events, damages and failures in the operation of power lines

Keywords: modeling, dependability, risk, fault tolerance, energy security, distributed power system, consumer

For citation: Boykova T.V., Grigoriev A.S., Makolkin D.V., Korolev S.A., Tutnov I.A. Quality and reliability of low-power power systems. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(3):28–37. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-4

Введение

Перспективы новых технологий в области безопасного и надежного функционирования системы энергетических установок и линий электропередач определяют актуальность формирования и верификации мер в аспектах энергетической безопасности потребителей энергии. Особую актуальность этой проблеме придают условия жизнедеятельности людей, находящихся в автономных агломерациях с существенно сниженной территориальной транспортной доступностью, для которых характерен сезонный характер поставки запасов топливных и иных энергетических ресурсов. Поиск решений этой проблемы в ряде случаев связан с проектированием надежной с высоким потребительским качеством системы сетевого энергоснабжения потребителей. Для энергетической безопасности автономных потребителей энергии малой мощности, которые дислоцированы в регионах с децентрализованным снабжением топливно-энергетическими ресурсами, проектирование энергосетей с оценкой их надежности и противоаварийной устойчивости имеет существенное значение.

В апробированных концепциях совершенствования национального российского энергетического комплекса декларируется необходимость широкого применения современных технологий для

решения проблемы энергетической безопасности населения и промышленности регионов [1–3], иных потребителей. В общем случае инженерная система проектирования, эксплуатации энергетических сетей для поставки потребителям электроэнергии, горячей воды и пара характеризуются большим набором факторов влияния на их функциональную безопасность и надежность, многомерной неопределенностью внешних опасных воздействий. Эти обстоятельства значительно усложняют управление рисками энергетической безопасности потребителей. Поэтому становится очевидным, что при проектировании локальных сетей энергоснабжения автономных потребителей, дислоцируемых в труднодоступных районах с децентрализованной схемой поставок топлива и энергии, выполнять нормы функциональной безопасности в аспектах деятельности энергетических объектов, реализовать требования надзорных органов в энергетике, промышленности и других секторах экономики страны, наиболее предпочтительно на базе широкого использования программно-целевого метода управления рисками. В целом проблема управления рисками и качеством поставки энергии автономному потребителю является актуальной, но она пока недостаточно изучена. В частности, еще только предстоит сформировать, верифицировать и апробировать перечень основных факторов риска, отказа, повреждения и разрушения локальных энергетических сетей с учетом оригинальных особенностей энергообеспечения регионов Российской Федерации и их труднодоступных территорий с низкой плотностью населения, автономных по роду своей деятельности промышленных и экономических зон.

Особенно это важно для потребителей, дислоцируемых вдали от основных топливно-энергетических транспортных сетей, для которых подключение к единой энергетической системе России затруднительно и экономически нецелесообразно. В основном энергоснабжение потребителей в этих районах производится за счет местной генерации с использованием дефицитных местных, а также привозных топливных ресурсов, в ряде случаев возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Этот факт определяет необходимость индивидуального подхода при проектировании локальных сетей энергоснабжения, особенно в части моделирования возможных сценариев отказов энергоснабжения автономных потребителей. Для таких проектов становится важным имитационное моделирование надежности и безопасности сетей с различными вариантами сценариев использования возможностей малой локальной генерации. Особенно актуальной данная задача становится в формате проектов генеральных схем энергоснабжения в случае локального (один источник и несколько автономных потребителей), местного или районного (несколько источников и потребителей), для которых характерно использование различных источников генерации по принципу действия, основному виду используемого топлива и т.д. При этом будущая работа таких источников генерации предпочтительно должна осуществляться в автоматическом режиме при минимальном техническом обслуживании и предупредительном ремонте.

В настоящее время имеется ряд инновационных проектов в Норвегии и в других странах, направленных на создание и эксплуатацию локальных многоузловых энергосистем в составе отдельных автономных потребителей и конечного числа установок генерации энергии, которые реализуются в формате распределенных энергетических сетей (РЭС) [2], например, проекты РЭС для энергоснабжения поселков геологических партий, автономных метеостанций, систем экологического мониторинга окружающего мира и пр. Использование в этих проектах вариантов сетей постоянного тока упрощает организацию необходимых перетоков электроэнергии между узлами сети в нужных на данный момент направлениях. Поэтому важно предложить метод, который позволяет адекватно формировать новые проектные решения по будущему облику энергетической сети для энергоснабжения автономных потребителей малой мощности и оценивать их качество. Например, такие проекты, которые позволяют включить в состав РЭС системы накопления и хранения энергии, являющиеся в различные моменты времени как «генератором», так и «потребителем».

Системно ориентированное проектирование и имитационное моделирование процессов поведения локальных РЭС для текущего периода развития энергетики представляет практический интерес для повышения энергетической безопасности территорий РФ. Положительный эффект от современных усилий по модернизации энергетической инфраструктуры и строительства новых объектов малой энергетики для развития промышленного и экономического потенциала арктического региона РФ в значительной степени зависит от технологии проектирования. Этот эффект усиливается от последующей длительной эксплуатации локальных и мобильных автономных систем энергоснабжения на принципах энергоэффективности, экологической приемлемости, экономической целесообразности и промышленной безопасности. Таким образом, формулируется научная задача о методе моделирования поведения и оценки надежности, качества локальных энергосистем с энергоустановками малой

мощности для решения проблем энергетической безопасности автономных потребителей энергии, дислоцируемых в малонаселенных и труднодоступных районах страны.

Метод и путь решения задачи

В нашем случае прогнозирование надежности энергосистем с автономными энергоустановками малой мощности основано на формировании сценариев их возможной будущей эксплуатации. В основе метода прогнозирования лежит свод общепринятых комплексных принципов энергетической безопасности потребителей энергии, энергоэффективности, качества процесса поставки и потребления энергии, рационального природопользования и экологической приемлемости технологий генерации и передачи энергии [4–6]. Метод реализуется путем вычислительного эксперимента по определению вероятностных показателей надежности по критериям возможного отказа и противоаварийной устойчивости в период эксплуатации РЭС. Для примера реализации данного метода решения поставленной задачи выбран вариант РЭС на постоянном токе. Информационную модель вычислительного эксперимента поясняет диаграмма Исикавы на рис. 1.

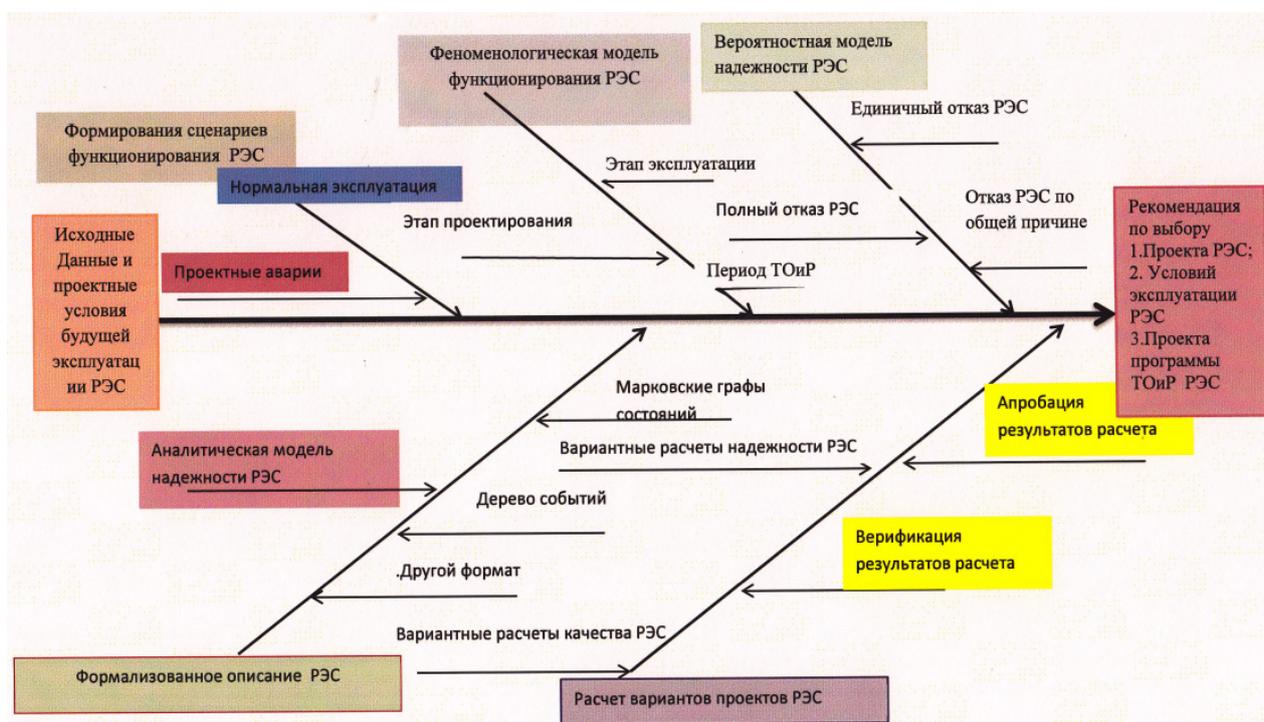


Рис. 1. Основные этапы имитационного моделирования РЭС

Исходными данными для расчета являются сведения из генеральной схемы энергоснабжения, перспективный план социально-экономического развития территории, будущей дислокации РЭС, сведения о природно-климатических и других существенных обстоятельствах, важных для функциональной безопасности РЭС и энергетической безопасности ее потребителей. На базе этих данных формируется перечень исходных событий и условий, которые могут привести к аварийной ситуации РЭС. Затем проводится вербальное описание событий и обстоятельств, которые могут привести к факту отказа РЭС и рискам для ее клиентов. Данное описание детализируется для нормальных, плановых условий будущей эксплуатации сети и для возможных аварийных ситуаций, в том числе от опасных природно-климатических внешних воздействий. Затем формируются схемы и сценарии возможных отказов РЭС и разрабатывается, верифицируется комплексная имитационная модель качества проекта сети. Прогнозирование надежности и оценка качества проектного решения по сети в нашем случае выполняются по показателям: вероятностного анализа функциональной безопасности будущего функционирования РЭС для длительного периода эксплуатации; противоаварийной устойчивости сети к внешним опасным воздействиям, риска для потребителей энергии, в аспектах возможного нарушения функционирования сети в части выполнения служебной функции по устойчивому и бездефицитному обеспечению энергией всех потребителей, клиентов сети.

Пример решения задачи

Для проектирования и создания РЭС для локального и местного секторов энергоснабжения автономных потребителей энергии в НИЦ «Курчатовский институт» развивается методология проектирования и создания многоузловой РЭС на постоянном токе. Отличительная особенность данного проектирования – автономные потребители обеспечивают себя энергией от собственных источников генерации, излишки произведенной энергии могут экспортировать в узловую РЭС. Эту экспортируемую энергию могут использовать другие автономные потребители РЭС, которые по каким-либо причинам имеют в этот период дефицит электроэнергии. Если все потребители РЭС полностью удовлетворяют в данный период времени свои потребности в электроэнергии, то ее общесетевые излишки могут накапливаться как в едином общесетевом аккумуляторе(-ах), в том числе и на основе производства электролизного водорода, так и индивидуальных аккумуляторах автономных потребителей. Перспективная схема построения узловой РЭС на локальном уровне отдельного поселения приведена на рис. 2.

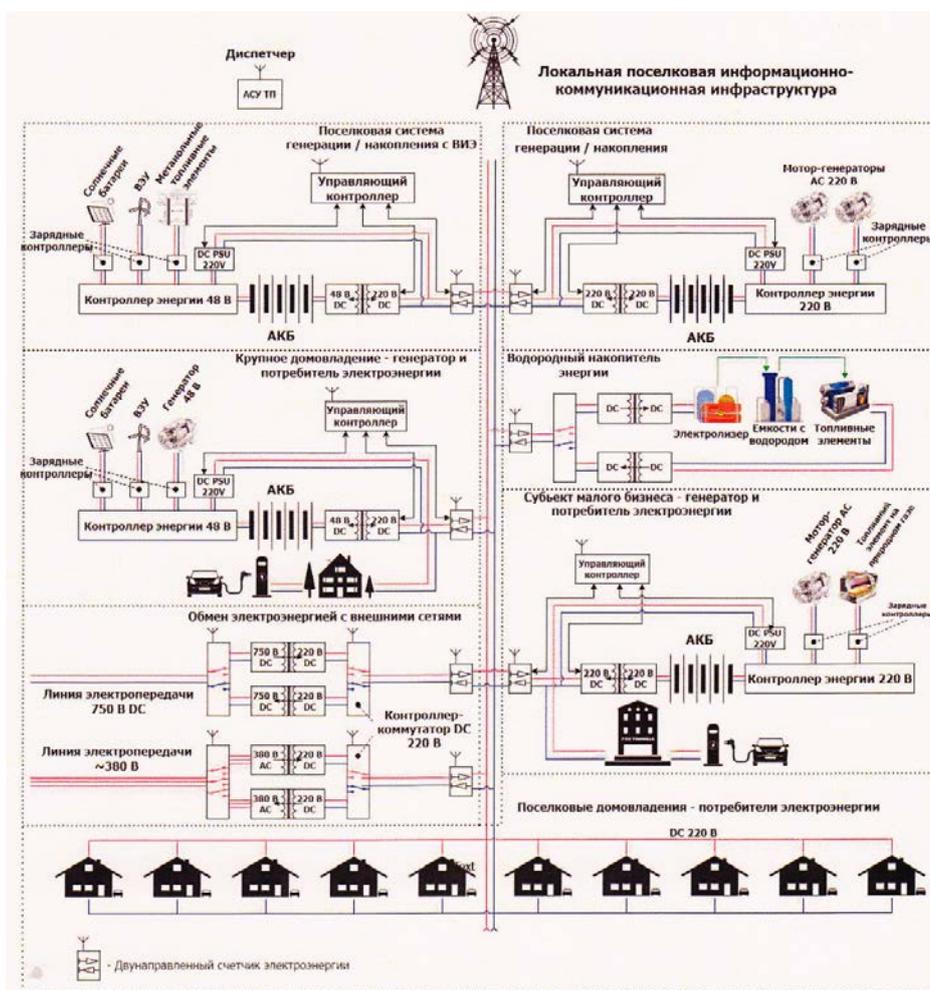


Рис. 2. Распределенная сеть узла – поселка

Рассматриваемые в рамках реализации перспективного проекта локальные РЭС могут включать в себя некоторое количество «узлов». Узлом может служить, например, солнечный генератор, который включает в себя блок солнечных батарей, аккумуляторную батарею (АКБ) с зарядным контроллером и DC/DC конвертер, нормализующий выходное напряжение солнечного генератора до стандартного. Также узлом может быть любая комбинация генераторов – солнечная батарея (СБ), ветрогенератор (ВГ), топливный элемент (ТЭ), дизель-генератор (ДГ), работающий на единую аккумуляторную батарею с выходным DC/DC контроллером. Узел может, кроме генераторов, иметь потребителей, таких как, например, жилой дом с солнечными батареями на крыше или с дизельгенератором в подвальном помещении. Наконец узлом может быть общественное аккумуляторное

хранилище, которое запасает излишки электроэнергии, не используемые потребителями. Таким образом, неперенные признаки узла – наличие источника электроэнергии и двунаправленного DC/DC конвертера, соединенного с сетью, объединяющей кластер. В кластере могут быть потребители, которые подключаются к РЭС непосредственно без DC/DC конвертеров. Возможный состав кластера представлен на рис. 3.



Рис. 3. Состав кластера РЭС

Перспективный проект РЭС предполагает возможность масштабирования вышеприведенной схемы по аналогии с сотами для передачи энергии на расстояние (рис. 4).

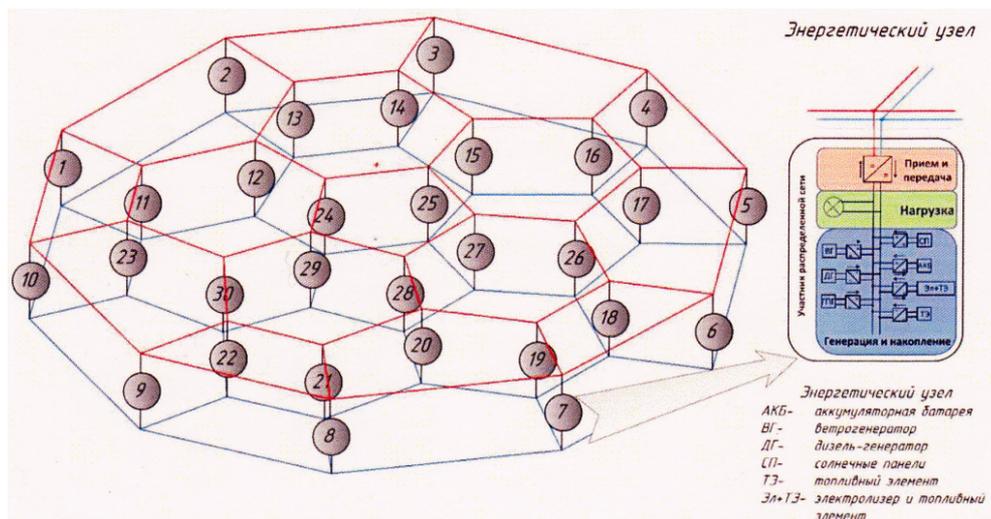


Рис. 4. Объединение узловых микросетей в РЭС для территории с децентрализованным энергоснабжением

РЭС на постоянном токе может создаваться в окружении уже существующих сетей на переменном токе. Например, когда на территории уже имеется одна центральная электростанция со своей сетью переменного тока, а дальнейшее подключение прилегающих к ней новых еще неэлектрифицированных территорий осуществляется распределенными сетями на постоянном токе, имеющими более высокую отказоустойчивость и меньшие потери при передаче энергии на большие расстояния.

Для решения задачи проектирования РЭС разработано оригинальное программное средство, которое предназначено для моделирования отказов линий электропередач такой сети. Потребители, источники генерации, узлы и кластеры РЭС, схема их соединения линиями электропередач являются исходными данными для моделирования. Аварийными событиями РЭС являются отказы линий электропередач, по выбранным возможным сценариям (фиксированное количество за назначенный период, случайное количество от 0 до N за период эксплуатации или его какая-то часть, отказы с заданной вероятностью по времени проявления разрушительных или пожароопасных событий на заданном периоде и пр.). Расчетное моделирование развития событий отказов ведется пошагово. На каждом шаге предполагаются обрывы линий электропередачи и определяется количество линий, соединяющих каждого участника, клиента с РЭС, и определяется, произошел ли частичный или полный отказ РЭС. Под частичным отказом подразумеваются следующие сценарии: какой-либо узел не имеет электрических связей ни с одним другим узлом; количество электрических связей какого-либо узла стало меньше заданного проектом минимального количества электрически связанных узлов m . Под полным отказом системы подразумеваются следующие сценарии: когда все линии передачи энергии вышли из строя (разрушены); когда не осталось узлов, количество электрических связей в которых больше заданного проектом минимального количества узлов m . По завершении всех вычислительных экспериментов программа переходит к вычислению показателей надежности и безопасности: сколько раз при заданных параметрах моделирования был обнаружен первый частичный отказ РЭС относительно общего количества вариантов моделирования поведения РЭС; средний период времени обнаружения первого частичного отказа РЭС; среднее количество отказов линий до момента частичного отказа РЭС; сколько раз при заданных параметрах моделирования был обнаружен полный отказ системы относительно общего количества экспериментов; средний период времени обнаружения полного отказа системы; среднее количество отказов линий до момента полного отказа системы.

Пример результатов расчетов возможных отказов РЭС. Для анализа влияния проектных решений РЭС на их надежность, противоаварийную устойчивость и качество проведено сравнение проектов сетей с различным количеством потребителей и источников генерации энергии (клиентов сети), в том числе РЭС с равным количеством клиентов при различных вариантах структурных решений по конфигурации сети. Сравнения проводились для двух групп вариантов решений. В первую группу вошли три схемы, состоящие из 12 клиентов РЭС, которые объединяются тремя разными способами «линейная», «кольцевая» и троированная – «трехсвязанная». Схемы «линейная» и «кольцевая» отражают принципы подключения к сети, схожие с подключением автономных потребителей к линейной и закольцованной линии электропередач. Принципиальным отличием таких сетей является возможность получения энергии при одиночном обрыве линии электропередач для «кольцевой» схемы, для «линейной» схемы такая возможность имеется для клиентов, которые имеют соединение только с одним узлом. Схема «трехсвязная» сформирована таким образом, что каждый узел РЭС имеет соединения со своими тремя близко расположенными узлами. Расчеты выполнялись для разного количества повторяющихся вычислений. Результаты расчетов показаны в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Результаты вычислительных экспериментов с различными длинами серий для 12-узловой схемы «тетрадр»

Номер серии	Серии по 10 испытаний, среднее количество линий	Серии по 20 испытаний, среднее количество линий	Серии по 50 испытаний, среднее количество линий	Серия по 100 испытаний, среднее количество линий	Серия по 500 испытаний, среднее количество линий	Серии по 1000 испытаний, среднее количество линий
1	2	3	4	5	6	7
1	8,5	8	7,68	7,85	7,51	7,593
2	7,5	7,1	8,02	7,41	7,676	7,568
3	6,8	8,25	7,16	7,4	7,62	7,716
4	7,4	7,65	7,66	7,53	7,516	7,563
5	8,2	8,25	7,44	7,36	7,706	7,546
6	8,3	7,45	7,36	7,41	7,726	7,723
7	7,5	7,35	7,56	7,47	7,54	7,7

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
8	7,8	7,59	7,5	7,77	7,586	7,659
9	7,3	7,65	7,54	7,89	7,52	7,54
10	9,2	7,6	7,18	7,84	7,572	7,715
Среднее значение	7,85	7,689	7,510	7,593	7,5972	7,6323
Полное количество испытаний	100	200	500	1000	5000	10000
Дисперсия средних значений	0,4917	0,14070	0,063756	0,047134	0,006594	0,005979

Таблица 2

Среднее значение количества отказавших линий до первого частичного отказа в трех типах проектных схем с 12 узлами РЭС

Номер серии	Тип схемы		
	«Трехсвязная»	«Линейная»	«Кольцевая»
1	7,85	2,74	3,58
2	7,41	2,57	3,61
3	7,4	2,51	3,98
4	7,53	2,68	3,47
5	7,36	2,49	3,6
6	7,41	2,39	3,69
7	7,47	2,72	3,49
8	7,77	2,52	3,73
9	7,89	2,55	3,7
10	7,84	2,43	3,74
Среднее значение	7,593	2,56	3,659
Полное количество испытаний	1000	1000	1000
Дисперсия	0,047134444	0,014155556	0,021521111

Таким образом, расчетом установлено, что для вычислительных экспериментов из 50 повторяющихся испытаний дисперсия средних значений, полученных в таких условиях, составила менее 1 %, что следует считать удовлетворительной точностью для данного расчета. Далее проводилось сравнение 12-узловых схем по критерию устойчивости к отказам линий электропередач. В ходе такого вычислительного модельного эксперимента проводится сравнение качества различных трех названных выше схем по показателю: «Число отказавших линий до первого частичного отказа РЭС». В ходе эксперимента на каждом периоде моделируется один отказ случайно выбранной линии. Если линия до этого была исправна – линия переходит в состояние «отказ», если линия уже была повреждена ранее – линия так и остается неисправной.

Для оценки устойчивости структурного варианта решения к отказам линий электропередач по отношению к масштабированию размера РЭС при увеличении количества клиентов РЭС проведено сравнение схем с различным количеством узлов и линий передачи энергии. Вычислительный эксперимент по сравнению трехсвязных схем с различным количеством клиентов показал хорошую масштабируемость проектных вариантов РЭС, в которых каждый клиент соединен с тремя соседями. Количество узлов и линий РЭС увеличивается пропорционально числу клиентов. Отказ РЭС может привести к первому частичному нарушению надежности энергоснабжения клиентов, он наступает, когда уже один из клиентов отключается от РЭС. Таким образом, расчетом показана возможность масштабирования РЭС без снижения их противоаварийной устойчивости, в аспекте возможных отказов линий электропередач для локального и местного секторов энергопотребления.

Для оценки влияния технического обслуживания и предупредительно-восстановительных ремонтов (ТОиР) линий электропередач на качество проектных решений РЭС проведена серия вычислительных экспериментов с целью анализа влияния фактов ремонта линий электропередачи на

события проявления частичных или полных отказов РЭС. С практической точки зрения такой анализ позволяет оптимизировать программу ТОиР по срокам выполнения и длительности ремонтных работ. В данном примере для моделирования отказов использовались проектные варианты РЭС, состоящие из 12 и 30 клиентов. Для каждого варианта проекта анализировались различные схемы соединений. РЭС из 12 клиентов образовывали схемы «кольцевую» и «трехсвязанную», а из 30 участников – «кольцевую», «трехсвязанную» и «четырёхсвязанную» (рис. 5).

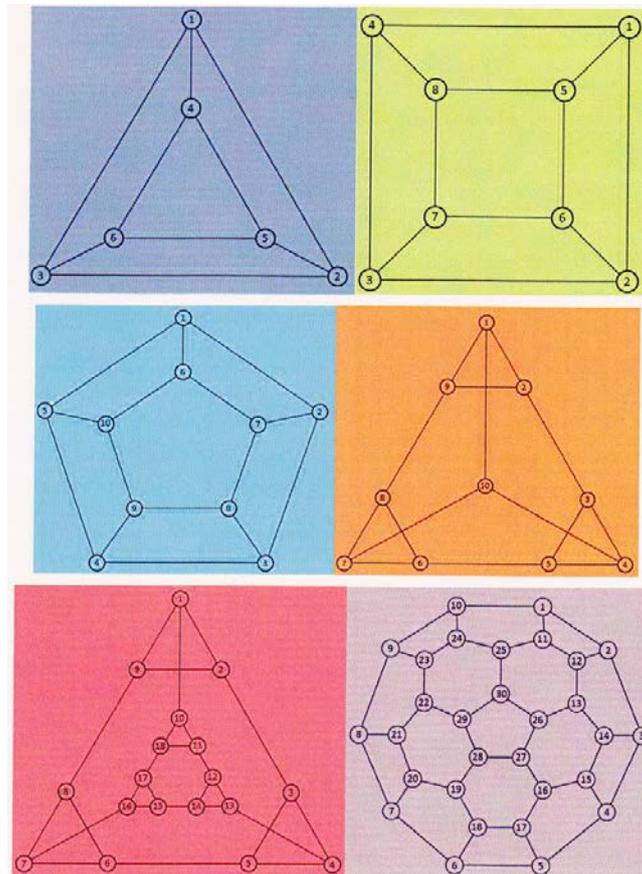


Рис. 5. Схемы соединения РЭС с числом клиентов: 6, 8, 10, 12, 18 и 30

В данном расчете для каждой схемы задавалось начальное состояние, когда все линии исправны, а количество отказов за шаг моделирования изменялось от 0 до n , где $n = 5$. В ходе вычислительных экспериментов производилось определение средней длительности периода до первого частичного отказа РЭС при заданном числе от 0 до 10 восстановлений ремонтном линий электропередачи за один период моделирования. По результатам 2000 вычислительных экспериментов определялась зависимость среднего времени до первого частичного отказа РЭС. Для оценки качества проектных решений по РЭС в аспектах программы ТОиР проведен анализ перспективности программы проектного предупредительно-восстановительного ремонта РЭС, когда восстановление линий электропередачи производится на шаге по времени, следующем после шага, на котором данные линии вышли из строя. Особенность такой программы ТОиР заключается в том, что для местностей, имеющих ограниченную доступность, время реагирования и исправление обрывов сети может быть значительным. Вследствие этого факта, даже если потенциальные возможности аварийной ремонтной бригады обеспечивают ремонт максимально возможного количества обрывов в сети за период моделирования, в этом сценарии частичные отказы РЭС все будут происходить из-за увеличенного времени реагирования ремонтной бригады. По мере повышения потенциала возможностей для быстрого реагирования ремонтной бригады для превентивного предупреждения отказов РЭС график показателя противоаварийной устойчивости сети по времени проходит этап начального медленного роста, перемещается в этап выхода в насыщение, когда дальнейшее повышение потенциала возможностей и численности ремонтной бригады перестает давать значимое улучшение устойчивости РЭС к отказам.

Заключение

Полученные в рамках проведенных вычислительных исследований результаты показывают, что определенное усложнение структурных решений в проектах РЭС способствует соответствующему увеличению их качества. В частности, повышается противоаварийная устойчивость РЭС к таким событиям, как обрывы линий электропередач в проектах более сложных по сравнению с линейной и кольцевой структурами энергетической сети. Показанный выше вариант проекта РЭС в формате «троирования – трехсвязанности», когда каждый клиент РЭС соединен с тремя соседями, позволяет спланировать оптимальную стратегию планирования и проведения ТОиР, вышедших из строя линий электропередачи для локального и местного вариантов секторов децентрализованного энергопотребления для территорий регионов в труднодоступных и малозаселенных зонах РФ. Применение инструментов вычислительного эксперимента для моделирования процесса отказов и выявления их последствий для энергоснабжения участников локальных и местных РЭС закладывает основу для расширения перечня превентивных воздействий на состояние сети для повышения ее функциональной надежности и в конечном итоге качества энергообеспечения автономных потребителей в труднодоступных регионах страны и их энергетической безопасности.

Дальнейшее исследование процессов генерации, передачи и потребления электрической энергии в таких распределенных энергетических сетях представляет практический интерес, особенно в аспектах повышения их устойчивости к случайному или умышленному деструктивному воздействию. Для реализации такого подхода к анализу качества проектов РЭС требуется проведение более детальных исследований с полномасштабным моделированием потребления и генерации энергии в отдельных узлах, возможных отказов в энергоснабжении клиентов сети с учетом циклов потребления/генерации для локальных узлов сети с ВИЭ, что может быть выполнено в будущем с помощью комплексного программного средства имитационного моделирования. Для решения задачи проектирования РЭС разработано оригинальное программное средство, которое предназначено для моделирования отказов линий электропередач такой сети. Потребители, источники генерации, узлы и кластеры РЭС, схема их соединения линиями электропередач являются исходными данными для моделирования.

Список литературы

1. Пименов А. О., Куликов Д. Г., Гольцов Е. Н., Гречко Г. И. Энергообеспечение в Арктике. Перспективы и проблематика развития малой атомной генерации в качестве источника энергоснабжения месторождений и удаленных объектов // Деловой журнал NEFTEGAZ.RU. 2018. № 1. С. 24–29.
2. Чистов И. В., Янсон С. Ю. Энергетическая безопасность в системе национальной безопасности Российской Федерации // Военный академический журнал. 2014. № 2. С. 94–100.
3. Воропай Н. И., Марченко О. В., Стенников В. А. Проблемы энергоснабжения регионов в энергетической стратегии России до 2030 г. и перспективы развития АЭС малой мощности // Атомная энергия. 2011. Т. 111, вып. 5. С. 262–268.
4. Ершов Г. А., Гавриленко В. М., Козлов Ю. И. Обеспечение надежности и безопасности ядерных энергетических объектов в процессе проектирования. Методология и практика // Теплоэнергетика. 2004. № 2. С. 56–59.
5. Барзов А. А., Сысоев Н. Н. Физико-технологическая инноватика. М. : МГУ имени М. В. Ломоносова, 2020. 258 с.
6. Григорьев А. С., Карасевич В. А., Пименов А. О. [и др.]. Научные положения и принципы проектирования, эксплуатации и вывода из эксплуатации источников генерации энергии для автономных потребителей малой мощности // Наука и техника в газовой промышленности. 2019. № 2. С. 92–103.

References

1. Pimenov A.O., Kulikov D.G., Gol'tsov E.N., Grechko G.I. Energy supply in the Arctic. Prospects and problems of development of small nuclear generation as a source of energy supply for deposits and remote facilities. *Delovoy zhurnal NEFTEGAZ.RU = Business Journal NEFTEGAZ.RU*. 2018;(1):24–29. (In Russ.)
2. Chistov I.V., Yanson S.Yu. Energy security in the national security system of the Russian Federation. *Voennyi akademicheskii zhurnal = Military Academic Journal*. 2014;(2):94–100. (In Russ.)
3. Voropay N.I., Marchenko O.V., Stennikov V.A. Problems of regional energy supply in the energy strategy of Russia until 2030 and prospects for the development of low-power nuclear power plants. *Atomnaya energiya = Atomic energy*. 2011;111(5):262–268. (In Russ.)
4. Ershov G.A., Gavrilenko V.M., Kozlov Yu.I. Ensuring the reliability and safety of nuclear power facilities in the design process. Methodology and practice. *Teploenergetika = Thermal power engineering*. 2004;(2):56–59. (In Russ.)

5. Barzov A.A. Sysoev N.N. *Fiziko-tehnologicheskaya innovatika = Physico-technological innovation*. Moscow: MGU imeni M.V. Lomonosova, 2020:258. (In Russ.)
6. Grigor'ev A.S., Karasevich V.A., Pimenov A.O. et al. Scientific provisions and principles of design, operation and decommissioning of energy generation sources for autonomous low-power consumers. *Nauka i tekhnika v gazovoy promyshlennosti = Science and technology in the gas industry*. 2019;(2):92–103. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Татьяна Владимировна Бойкова

аспирант,
Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт»
(Россия, г. Москва, площадь Академика Курчатова, 1)
E-mail: nrcki@nrcki.ru

Александр Сергеевич Григорьев

кандидат технических наук, начальник отдела,
Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт»
(Россия, г. Москва, площадь Академика Курчатова, 1)
E-mail: nrcki@nrcki.ru

Дмитрий Владимирович Маколкин

начальник группы,
Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт»
(Россия, г. Москва, площадь Академика Курчатова, 1)
E-mail: nrcki@nrcki.ru

Сергей Андреевич Королев

начальник группы,
Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт»
(Россия, г. Москва, площадь Академика Курчатова, 1)
E-mail: nrcki@nrcki.ru

Игорь Александрович Тутнов

доктор технических наук, начальник лаборатории,
Национальный исследовательский центр
«Курчатовский институт»
(Россия, г. Москва, площадь Академика Курчатова, 1)
E-mail: andt@mail.ru

Tatyana V. Boykova

Postgraduate student,
National Research Center
"Kurchatov Institute"
(1 Akademika Kurchatov square, Moscow, Russia)

Aleksandr S. Grigoriev

Candidate of technical sciences, head of department,
National Research Center
"Kurchatov Institute"
(1 Akademika Kurchatov square, Moscow, Russia)

Dmitriy V. Makolkin

Head of the group,
National Research Center
"Kurchatov Institute"
(1 Akademika Kurchatov square, Moscow, Russia)

Sergey A. Korolev

Head of the group,
National Research Center
"Kurchatov Institute"
(1 Akademika Kurchatov square, Moscow, Russia)

Igor A. Tutnov

Doctor of technical sciences, head of the laboratory,
National Research Center
"Kurchatov Institute"
(1 Akademika Kurchatov square, Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 06.05.2023

Поступила после рецензирования/Revised 07.06.2023

Принята к публикации/Accepted 03.07.2023

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ НА БАЗЕ ПРИНЦИПА СИНТЕЗИРОВАННОГО ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Е. Ю. Шмалько

Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук, Москва, Россия
Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия
e.shmalko@gmail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* В стремлении к автоматизации различных процессов жизнедеятельности для повышения их качества очевидной становится необходимость автоматизировать и сам процесс автоматизации, т.е. разработки систем управления, чтобы сделать его быстрым и универсальным. Это звучит особенно актуально в условиях всевозрастающей роботизации и появления разнообразных роботов в качестве объектов управления. Наиболее общей задачей робототехники является синтез управления с обратной связью. Она предполагает, что система управления, обеспечивающая достижение объектом цели, проектируется в зависимости от состояния объекта оптимально по заданным критериям. Задача синтеза является актуальной, но общих подходов к ее решению на сегодняшний день не существует. В данной работе предлагается инверсный подход к синтезу оптимальной системы управления с обратной связью на основе методов машинного обучения для получения реализуемых решений задачи оптимального управления. *Материалы и методы.* В работе представлен принцип синтезированного оптимального управления. Общая идея состоит в следующем. Сначала стабилизируем объект относительно некоторой точки пространства состояний, решая задачу синтеза системы стабилизации. Добавление системы стабилизации в модель объекта придает ей новое свойство: в каждый момент времени объект имеет точку равновесия. Вблизи точки равновесия все решения сходятся. Таким образом, задача оптимального управления решается через оптимальное положение точки равновесия. *Результаты.* Приведены обоснования и сформулирован принцип синтезированного оптимального управления, включающий этап синтеза системы стабилизации. Представлена реализация системы управления квадрокоптером на основе принципа синтезированного оптимального управления. *Выводы.* При решении задачи оптимального управления необходимо дополнительно обеспечить движение объекта по полученной траектории для компенсации возможных постоянно существующих неопределенностей. В представленном синтезированном подходе оптимального управления неопределенность компенсируется устойчивостью системы относительно точки в пространстве состояний.

Ключевые слова: машинное обучение, оптимальное управление, модель, синтез, квадрокоптер

Для цитирования: Шмалько Е. Ю. Машинное обучение систем управления с обратной связью на базе принципа синтезированного оптимального управления // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 38–49. doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-5

MACHINE LEARNING OF CONTROL SYSTEMS WITH FEEDBACK BASED ON THE PRINCIPLE OF SYNTHESIZED OPTIMAL CONTROL

E.Yu. Shmalko

Federal Research Center "Informatics and Management"
Russian Academy of Sciences (FITZ IU RAS), Moscow, Russia
Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
e.shmalko@gmail.ru

Abstract. *Background.* In an effort to automate various life processes to improve their quality, the need to automate the development of control systems becomes obvious to make it fast and universal. This sounds especially relevant in the context of ever-increasing robotization and the emergence of various robots as control objects. The most common task of robotics is the synthesis of feedback control. It assumes that the control system that ensures the achievement of

the goal by the object is designed, depending on the state of the object, optimally according to specified criteria. The task of synthesis is relevant, but there are no general approaches to its solution today. In this paper, an inverse approach is proposed to the synthesis of an optimal feedback control system based on machine learning methods to obtain realizable solutions to the optimal control problem. *Materials and methods.* The paper presents the principle of synthesized optimal control. The general idea is as follows. First, the object is stabilized with respect to some point in the state space, through the solution of the problem of synthesis of the stabilization system. Adding a stabilization system to the object model gives it a new property: at each moment of time, the object has a point of equilibrium. Near the equilibrium point, all solutions converge. Thus, the problem of optimal control is solved through the optimal position of the equilibrium point. *Results.* Substantiations are given and the principle of synthesized optimal control is formulated, which includes the stage of synthesis of the stabilization system. The implementation of the quadcopter control system based on the principle of synthesized optimal control is presented. *Conclusions.* When solving the problem of optimal control, it is necessary to additionally ensure the movement of the object along the obtained trajectory to compensate for possible constantly existing uncertainties. In the presented synthesized optimal control approach, the uncertainty is compensated by the stability of the system with respect to a point in the state space. The approach is universal and is not limited to certain types of control object models or control quality functionals. It can be argued that this approach is machine learning of control systems with feedback.

Keywords: machine learning, optimal control, model, synthesis, quadcopter

For citation: Shmalko E.Yu. Machine learning of control systems with feedback based on the principle of synthesized optimal control. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(3):38–49. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-5

Введение

В области робототехники большинство современных систем управления роботами программируются вручную, и инженеры даже не ставят общих задач, потому что нет общих способов их решения. Разработчик, исходя из своего опыта, задает структуру системы управления, определяет каналы управления, типы регуляторов, а затем настраивает параметры данной системы так, чтобы они соответствовали определенным требованиям [1]. Современные цифровые системы управления роботами выполнены в виде программ. В таком случае, если робот должен выполнять достаточно простые действия, например, перемещаться из одной точки в другую и объезжать какие-то препятствия, то программный код его системы управления может содержать несколько сотен строк. В более сложных задачах управления программы, которые должны управлять роботами, могут включать несколько десятков или сотен тысяч строк. Эти программы будут расширяться по мере усложнения задач или структуры роботов. Можно предположить, что система управления роботом, повторяющим действия мухи, должна содержать несколько миллионов строк. Из изложенного выше следует, что ручное создание системы управления роботом является бесперспективным направлением. Необходимо автоматизировать этот процесс. При этом любую задачу можно и нужно считать оптимальной, определяя не только параметры, но и структуру системы управления оптимально, и при этом автоматически.

Для достижения цели всесторонней автоматизации необходимо обобщить решаемые задачи, а значит, сформулировать их в общих математических постановках, а затем разработать универсальные методы их решения. Однако проблема здесь в том, что, несмотря на обширную фундаментальную базу теории управления, сегодня существует широкий круг прикладных задач, не имеющих точных аналитических решений. В то же время существует объективная потребность в их решении.

Любая задача для роботов, как и любых других объектов управления, может быть сформулирована как задача математической оптимизации, например, задача оптимального управления для нахождения оптимального пути в текущих условиях, задача стабилизации движения по оптимальной траектории, задача предотвращения столкновений со статическими и динамическими препятствиями, задача взаимодействия с другими объектами управления, задача точного достижения некоторых заданных граничных условий и т.д.

Наиболее общей задачей робототехники является синтез управления с обратной связью. Предполагается, что система управления, обеспечивающая достижение цели объектом управления, проектируется в зависимости от состояния объекта оптимально по заданным критериям. Даже если задача оптимального управления решена и оптимальный путь найден, необходимо дополнительно обеспечить движение объекта по полученной траектории для компенсации возможных постоянно существующих неопределенностей.

Общая задача синтеза была сформулирована еще в начале 1960-х гг. Беллманом [2], когда непрерывная по времени нелинейная задача оптимального управления решалась через уравнение

Гамильтона – Якоби – Беллмана (НJB), представляющего собой нелинейное дифференциальное уравнение в частных производных. Даже в простых случаях уравнение НJB может не иметь глобальных аналитических решений. В литературе [3–5] были предложены различные численные методы, основанные на методе динамического программирования, включая современный метод адаптивного динамического программирования [6] и обучение с подкреплением [7]. Однако основным недостатком методов динамического программирования сегодня по-прежнему является вычислительная сложность, необходимая для нахождения функции Беллмана (value function), которая экспоненциально растет с увеличением размерности ее области определения.

Другой способ построения оптимального управления с обратной связью состоит в том, чтобы сначала решить задачу оптимального управления любым из доступных методов [8, 9], а затем синтезировать систему стабилизации с обратной связью для обеспечения движения по полученной оптимальной траектории. Например, в работе [10] на траектории выбираются точки, и объект стабилизируется в этих точках. Это наиболее популярный практический подход к проектированию оптимальной системы управления с обратной связью.

Однако по критерию оптимальности такой подход некорректен, так как получается, что оптимальная траектория рассчитывается для одного объекта управления, а введенная система стабилизации изменяет объект, так что рассчитанная изначально траектория может быть не оптимальной для модифицированной модели объекта. Кроме того, при приближении к заданной точке траектории система замедляется, что так же не является оптимальным движением в том случае, если функционал объекта учитывал быстроедействие системы, поэтому в каждой конкретной задаче необходимо проводить дополнительные оценки по оптимальным моментам переключения точек.

В данной работе предлагается инверсный подход к синтезу оптимальной системы управления с обратной связью [11]. Общая идея состоит в следующем. Сначала решается задача синтеза системы стабилизации и объект стабилизируется в некоторую точку пространства состояний. Обратим внимание, что эта задача вычислительно проще, чем общая задача синтеза. Задача стабилизации может решаться самыми разными методами аналитически или технически в зависимости от сложности и специфики математической модели объекта [12–16]. Сегодня современные численные методы машинного обучения могут быть применены для поиска решения задачи синтеза системы стабилизации для динамических объектов общего вида [17–19].

Добавление системы стабилизации в модель объекта придает ей новое свойство: в каждый момент времени объект имеет точку равновесия. Таким образом, в синтезированном подходе оптимального управления возможная неопределенность в правых частях дифференциальных уравнений модели или в начальных условиях компенсируется устойчивостью системы относительно точки в пространстве состояний. Вблизи точки равновесия все решения сходятся.

Теперь мы можем решить задачу оптимального управления через оптимальное положение точки равновесия. Управление объектом осуществляется путем изменения положения точки устойчивого равновесия, осуществляя переключение через заданный интервал времени между оптимально расположенными точками стабилизации. Поиск координат точек стабилизации реализуется как задача конечномерной оптимизации. Найденное синтезированное оптимальное управление может быть реализовано в реальном объекте непосредственно без дополнительных контуров стабилизации с обратной связью.

Машинное обучение системы управления с обратной связью

С целью автоматизации проектирования системы автоматического управления необходимо сформулировать для ЭВМ задачу управления и заставить вычислительную машину решать ее автоматически без участия человека.

Для этого сформулируем задачу в общей математической постановке оптимального управления. Задана математическая модель объекта управления в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений, записанных в форме Коши

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}), \quad (1)$$

где \mathbf{x} – вектор состояния объекта управления, $\mathbf{x} \in X \subseteq \mathbb{R}^n$; \mathbf{u} – вектор управления, $\mathbf{u} \in U \subseteq \mathbb{R}^m$, U – компактное множество, $m \leq n$.

Для системы (1) заданы начальные и терминальные условия

$$\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}^0, \quad (2)$$

$$\mathbf{x}(t_f) = \mathbf{x}^f, \quad (3)$$

где t_f – терминальное время окончания процесса управления, которое не задано, но ограничено, и определяется по достижению терминального состояния (3).

Задан критерий качества управления в виде интегрального функционала

$$J_0 = \int_0^{t_f} \mathbf{f}_0(\mathbf{x}, \mathbf{u}) dt \rightarrow \min. \quad (4)$$

Необходимо найти функцию управления в виде

$$\mathbf{u} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, t), \quad (5)$$

где $\mathbf{g}(\mathbf{x}, t) = [g_1(\mathbf{x}, t) \dots g_m(\mathbf{x}, t)]^T$, что позволяет объекту (1) достичь заданной цели (3) с оптимальным значением критерия качества (4). Найденная функция управления (5) должна удовлетворять ограничениям

$$u_i^- \leq g_i(\mathbf{x}, t) \leq u_i^+, \quad i = 1, \dots, m. \quad (6)$$

Мы ищем управление как функцию состояния объекта, что соответствует принципу управления с обратной связью. Принято считать, что данный вид управления реализуется в реальных системах, поскольку позволяет нивелировать неточности модели.

Для того, чтобы математическая модель соответствовала динамическому реальному объекту, необходимо и достаточно, чтобы погрешность математической оценки состояния реального объекта не возрастала во времени.

Тогда введем следующее определение.

Определение. Модель объекта управления является *реализуемой* на интервале $[t_0, T]$, если ее ошибка на требуемом интервале не увеличивается более, чем на некоторую заданную погрешность δ .

Получается, что введение управления с обратной связью в систему дифференциальных уравнений, описывающих динамику объекта управления, придает системе некоторое свойство, позволяющее достичь цели с оптимальным значением качества, т.е. быть реализуемым.

Фактически, вводя систему с обратной связью, мы изменяем дифференциальные уравнения системы так, что вокруг некоторого частного решения системы (оптимальной траектории при найденном оптимальном управлении)

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{g}(\mathbf{x}, t)) \quad (7)$$

появляется определенная область, из которой другие траектории, попадающие в эту область, не выходят.

Согласно теории устойчивости движения [20], частное решение $\mathbf{x}(t, \mathbf{x}^0)$ дифференциального уравнения (7) обладает свойством сжимаемости, если для любого другого частного решения $\mathbf{x}(t, \mathbf{x}^*)$

выполняются следующие условия:
если

$$\mathbf{x}(t', \mathbf{x}^0) - \mathbf{x}(t', \mathbf{x}^*) \leq \sigma, \quad (8)$$

где $t' > 0$, $\sigma > 0$, тогда $\exists \alpha > 0$, что $\forall \varepsilon^+ > 0$

$$\mathbf{x}(t' + \alpha, \mathbf{x}^0) - \mathbf{x}(t' + \alpha, \mathbf{x}^*) \leq \varepsilon^+. \quad (9)$$

Гипотеза. Для того, чтобы найденная функция оптимального управления (5) была реализуемой на объекте управления, соответствующая оптимальная траектория должна обладать свойством сжимаемости (8) и (9).

Действительно, если функция управления обеспечивает выполнение свойства сжимаемости (8) и (9), то эта функция управления, согласно определению, может быть реализована непосредственно в реальном объекте. Таким образом, для решения поставленной задачи оптимального управления с обратной связью необходимо построить такую функцию управления (5), которая позволяет объекту (1) достигать заданной цели (3) с оптимальным значением критерия качества (4) и получить требуемые свойства (8) и (9).

Принцип синтезированного оптимального управления

Для решения поставленной задачи оптимального управления с дополнительными свойствами реализуемости рассмотрим принцип синтезированного оптимального управления [21, 22].

Идея подхода состоит в том, чтобы обеспечить объекту существование некоторой точки равновесия в пространстве состояний, а затем построить такую функцию управления, которая управляет положением точки равновесия так, чтобы объект достиг цели с оптимальным значением критерия качества.

Первоначально решается задача синтеза системы стабилизации, обеспечивающая существование точки равновесия. В результате находится функция управления в следующем виде:

$$\mathbf{u} = \mathbf{h}(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}), \quad (10)$$

где \mathbf{x}^* в каждый фиксированный момент времени – некоторая точка в пространстве состояний, влияющая на положение точки равновесия дифференциального уравнения:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{h}(\mathbf{x}^* - \mathbf{x})), \quad (11)$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}) = [h_1(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}) \dots h_m(\mathbf{x}^* - \mathbf{x})]^T.$$

Функция управления (10) должна удовлетворять ограничениям для любого положения точки \mathbf{x}^*

$$u_i^- \leq h_i(\mathbf{x}^* - \mathbf{x}) \leq u_i^+, \quad i = 1, \dots, m. \quad (12)$$

Для любого значения \mathbf{x}^* система дифференциальных уравнений (11) имеет точку равновесия $\tilde{\mathbf{x}}(\mathbf{x}^*)$: $\mathbf{f}(\tilde{\mathbf{x}}(\mathbf{x}^*), \mathbf{h}(\mathbf{x}^* - \tilde{\mathbf{x}}(\mathbf{x}^*))) = 0$.

Матрица Якоби

$$\mathbf{A}(\mathbf{x}^*) = \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{x}^* - \mathbf{x})}{\partial \mathbf{x}},$$

вычисляемая в точке равновесия $\tilde{\mathbf{x}}(\mathbf{x}^*)$, имеет все собственные значения в левой полуплоскости комплексной плоскости:

$$\det(\mathbf{A}(\mathbf{x}^*) - \lambda \mathbf{E}) = \prod_{i=1}^n (\lambda - \lambda_j) = 0,$$

где $\lambda_j = \alpha_j + i\beta_j$, $\alpha_j < 0$, $j = 1, \dots, n$, $i = \sqrt{-1}$.

Во многих случаях точка равновесия $\tilde{\mathbf{x}}$ совпадает с точкой \mathbf{x}^* , но иногда это невозможно. Например, если система дифференциальных уравнений включает уравнение $\dot{x}_k = x_k$, то компонента x_k точки равновесия будет иметь только значение 0 при любых значениях компонент x_k^* .

С вычислительной точки зрения, чтобы обеспечить системе существование устойчивой точки равновесия $\tilde{\mathbf{x}}$, решается задача синтеза функции управления. Для этого необходимо задать область определения $X \in \mathbb{R}^n$ и затем определить точку равновесия $\tilde{\mathbf{x}}$. Если точка равновесия равна точке \mathbf{x}^* , то функция управления ищется в виде (10), где $\mathbf{x}^* = \tilde{\mathbf{x}}$. Таким образом, решается задача синтеза (1) –

(5) с заданным терминальным состоянием $\mathbf{x}^f = \tilde{\mathbf{x}}$, с определенной областью возможных начальных состояний $X_0 \subset X$ и критерием качества

$$J_1 = \max\{t_{f,1}, \dots, t_{f,K}\} + a_1 \sum_{i=1}^K \Delta_{f,i} \rightarrow \min, \quad (13)$$

где a_1 – весовой коэффициент,

$$\Delta_{f,i} = \mathbf{x}^f - \mathbf{x}(t_{f,i}, \mathbf{x}^{0,i}), \quad (14)$$

$t_{f,i}$ – время достижения конечного положения \mathbf{x}^f из начального условия $\mathbf{x}^{0,i}$ множества начальных условий $X_0 = \{x^{0,1}, \dots, x^{0,K}\}$, $i \in \{1, \dots, K\}$,

$$t_{f,i} = \begin{cases} t, & \text{если } t < t^+ \text{ и } \Delta_{f,i} \leq \varepsilon, \\ t^+ & \text{– иначе,} \end{cases} \quad (15)$$

где t^+ и ε – заданные положительные величины; $\mathbf{x}(t_{f,i}, \mathbf{x}^{0,i})$ – частное решение системы

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{h}(\mathbf{x}^f - \mathbf{x})), \quad (16)$$

для начальных условий $\mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}^{0,i}$, $i \in \{1, \dots, K\}$,

$$\mathbf{x}^f - \mathbf{x} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i^f - x_i)^2}. \quad (17)$$

На втором этапе решается следующая задача оптимального управления через определение оптимального расположения точек равновесия. Математическая модель объекта управления задается в виде (11), а начальные условия задаются в виде (2). Необходимо найти управление как функцию времени, определяющую в каждый момент времени положение точки равновесия:

$$\mathbf{x}^* = \mathbf{v}^*(t), \quad (18)$$

доставляющую минимум функционалу

$$J_2 = \int_0^{t_f} \mathbf{f}_0(\mathbf{x}, \mathbf{x}^* - \mathbf{x}) dt \rightarrow \min_{\mathbf{x} \in X}. \quad (19)$$

Найденное управление

$$\mathbf{u} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{h}(\mathbf{v}^*(t) - \mathbf{x})$$

удовлетворяет условиям (8) и (9) в виду наличия устойчивой точки равновесия в каждый момент времени, следовательно, является реализуемым на объекте.

Вычислительный эксперимент

Рассмотрим задачу оптимального управления пространственным движением квадрокоптера в пространстве с фазовыми ограничениями.

В общем случае математическая модель квадрокоптера как твердого тела имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= F(\cos(\gamma)\sin(\theta)\cos(\psi) + \sin(\gamma)\sin(\psi)) / m, \\ \ddot{y} &= F\cos(\gamma)\cos(\theta) / m - g, \\ \ddot{z} &= F(\cos(\gamma)\sin(\theta)\sin(\psi) + \sin(\gamma)\cos(\psi)) / m, \\ \ddot{\gamma} &= ((I_{yy} + I_{zz})\dot{\theta}\dot{\psi} + M_x) / I_{xx}, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\ddot{\Psi} = \left((I_{zz} + I_{xx}) \dot{\gamma} \dot{\theta} + M_y \right) / I_{yy},$$

$$\ddot{\theta} = \left(I_{xx} + I_{yy} \right) \dot{\gamma} \dot{\theta} + M_z / I_{zz},$$

где F – суммарная сила тяги всех винтов квадрокоптера, m – масса квадрокоптера, g – ускорение свободного падения, $g = 9,80665$, M_x , M_y , M_z – управляющие моменты, создаваемые винтами квадрокоптера вокруг соответствующих осей.

На рис. 1 представлена связь углов поворота квадрокоптера с его осями.

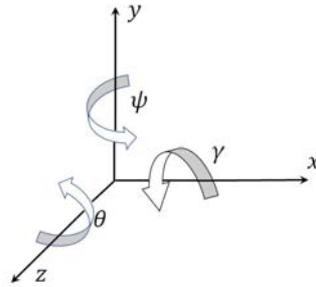


Рис. 1. Система координат квадрокоптера

Для преобразования модели в векторную запись вводятся следующие обозначения: $x = x_1$, $y = x_2$, $z = x_3$, $\dot{x}_1 = x_4$, $\dot{x}_2 = x_5$, $\dot{x}_3 = x_6$, $\gamma = x_7$, $\Psi = x_8$, $\theta = x_9$, $\dot{\gamma} = x_{10}$, $\dot{\Psi} = x_{11}$, $\dot{\theta} = x_{12}$, $M_1 = M_x$, $M_2 = M_y$, $M_3 = M_z$.

В результате получается следующая математическая модель:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_4, \\ \dot{x}_2 &= x_5, \\ \dot{x}_3 &= x_6, \\ \dot{x}_4 &= F \left(\cos(x_7) \sin(x_9) \cos(x_8) + \sin(x_7) \sin(x_8) \right) / m, \\ \dot{x}_5 &= F \left(\cos(x_7) \cos(x_9) \right) / m - g, \\ \dot{x}_6 &= F \left(\cos(x_7) \sin(x_9) \sin(x_8) + \sin(x_7) \cos(x_8) \right) / m, \\ \dot{x}_7 &= x_{10}, \\ \dot{x}_8 &= x_{11}, \\ \dot{x}_9 &= x_{12}, \\ \dot{x}_{10} &= \left((I_{yy} + I_{zz}) x_{11} x_{12} + M_1 \right) / I_{xx}, \\ \dot{x}_{11} &= \left((I_{zz} + I_{xx}) x_{10} x_{12} + M_2 \right) / I_{yy}, \\ \dot{x}_{12} &= \left((I_{xx} + I_{yy}) x_{10} x_{11} + M_3 \right) / I_{zz}, \end{aligned} \tag{21}$$

где \mathbf{x} – вектор пространства состояний, $\mathbf{x} = [x_1 \dots x_n]^T$, \mathbf{M} – вектор управляющих моментов, $\mathbf{M} = [M_1 \ M_2 \ M_3]^T$.

Как правило, квадрокоптеры, предлагаемые сегодня на рынке, выпускаются с предустановленной системой угловой стабилизации. Система стабилизации углов обеспечивает устойчивое положение квадрокоптера относительно заданных углов управляющими моментами:

$$M_i = w_i (x_7^* - x_7, x_8^* - x_8, x_9^* - x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}), \quad i = 1, 2, 3. \quad (22)$$

Предположим, что система угловой стабилизации достаточно быстро обрабатывает заданные углы квадрокоптера, по крайней мере, по сравнению с пространственным перемещением. В этом случае можно предположить, что управление пространственным перемещением квадрокоптера осуществляется с помощью его углового положения и силы тяги. Определим компоненты вектора пространственного управления: $x_7 = u_1$, $x_8 = u_2$, $x_9 = u_3$, $F/m = u_4$.

Тогда математическая модель пространственного движения квадрокоптера имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_4, \\ \dot{x}_2 &= x_5, \\ \dot{x}_3 &= x_6, \\ \dot{x}_4 &= u_4 (\sin(u_3) \cos(u_2) \cos(u_1) + \sin(u_1) \sin(u_2)), \\ \dot{x}_5 &= u_4 \cos(u_3) \cos(u_1) - g, \\ \dot{x}_6 &= u_4 (\cos(u_2) \sin(u_1) - \cos(u_1) \sin(u_2) \sin(u_3)). \end{aligned} \quad (23)$$

Математическая модель объекта управления (23) описывает пространственное перемещение центра масс квадрокоптера за счет изменения его углов u_1 , u_2 , u_3 и суммарной тяги винтов u_4 . В модели вектор пространства состояний $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^6$, вектор управления $\mathbf{u} \in U \subseteq \mathbb{R}^4$, где U – компактное множество, определяемое ограничениями на значения компонент вектора управления. Ограничения на управление имеют следующие значения:

$$\begin{aligned} u_1^- &= -\frac{\pi}{12} \leq u_1 \leq \frac{\pi}{12} = u_1^+, \\ u_2^- &= -\pi \leq u_2 \leq \pi = u_2^+, \\ u_3^- &= -\frac{\pi}{12} \leq u_3 \leq \frac{\pi}{12} = u_3^+, \\ u_4^- &= 0 \leq u_4 \leq 12 = u_4^+. \end{aligned} \quad (24)$$

Задано начальное положение квадрокоптера:

$$\mathbf{x}^0 = [0 \ 5 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T. \quad (25)$$

Определено целевое терминальное состояние:

$$\mathbf{x}(t_f) = \mathbf{x}^f = [10 \ 5 \ 10 \ 0 \ 0 \ 0]^T, \quad (26)$$

где t_f – время достижения терминального состояния (26), t_f не задано, но ограничено $t_f \leq t^+$, где $t^+ = 5,6$ – заданное предельное время.

Фазовые ограничения заданы в виде цилиндров:

$$\varphi_i(\mathbf{x}) = r_i - \sqrt{(x_{\{1,i\}} - x_1)^2 + (x_{\{3,i\}} - x_3)^2} \leq 0, \quad i = 1, 2, \quad (27)$$

где $r_1 = 2,5$, $r_2 = 2,5$, $x_{1,1} = 2,5$, $x_{1,2} = 7,5$, $x_{3,1} = 2,5$, $x_{3,2} = 7,5$.

Функционал качества задан в следующем виде:

$$J = t_f + p_1 \int_0^{t_f} \sum_{i=1}^2 \vartheta(\varphi_i(\mathbf{x})) dt + p_2 \mathbf{x}^f - \mathbf{x}(t_f) \rightarrow \min, \quad (28)$$

где $p_1 = 2$, $p_2 = 1$ – заданные весовые коэффициенты, t_f – время достижения терминального состояния, $t^+ = 5,6$, $\varepsilon = 0,01$.

Необходимо найти управление $\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)$, переводящее объект (23) из начального состояния (25) в терминальное (26) с минимальным значением функционала качества (28) с учетом фазовых ограничений (27) и с учетом имеющихся ограничений на управление (24).

Согласно принципу синтезированного оптимального управления, на первом этапе решается задача пространственной стабилизации квадрокоптера с целью получения устойчивой точки равновесия в пространстве состояний. Для решения этой задачи был применен метод машинного обучения на основе символьной регрессии, а также метод сетевого оператора [23]. В результате была получена следующая система стабилизации:

$$u_i = \begin{cases} u_i^+, & \text{если } \bar{u}_i \geq u_i^+, \\ u_i^-, & \text{если } \bar{u}_i \leq u_i^-, \\ \bar{u}_i - \text{иначе,} \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (10)$$

где математические выражения для \bar{u}_i , $i = 1, 2, 3, 4$, определяются как выходные элементы матрицы сетевого оператора, представленной на рис. 2, с параметрами $q_1 = 7,26733$, $q_2 = 11,46021$, $q_3 = 12,77271$, $q_4 = 3,20630$, $q_5 = 8,36914$, $q_6 = 5,50562$. Значения управлений в каждый момент времени по матрице сетевого оператора на борту объекта вычисляются с помощью бортового программного модуля [24].

На втором этапе находились положения точек стабилизации для оптимального управления объектом. Точки переключались с временным интервалом 0,4. На каждом интервале нужно было найти три координаты точки $\mathbf{x}^* = [x_1^* \ x_2^* \ x_3^*]^T$. Остальные координаты точек равны нулю. Так как $t^+ = 5,6$, то число интервалов было $5,6/0,4 = 14$, тогда необходимо было найти $14 \cdot 3 = 42$ параметра. Задача решалась методом оптимизации PSO [25]. На рис. 3 представлена полученная проекция движения квадрокоптера на горизонтальную плоскость.

```

PsiBasc:array [0..35,0..35] of integer=
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 1,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0),
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,1,0,0, 0,0,0,9, 0,0,0,14, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0),
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,1,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0),
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,1, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0),

(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 1,0,0,0, 0,2,0,10, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0),
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,1,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0),
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 1,0,0,0, 0,0,0,11, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,4),
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,1,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0),

(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,1,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0),
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,1, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0),
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 1,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0),
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,1,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0),

(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 2,0,0,0, 0,0,1,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0),
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,2,0,0, 0,0,0,1, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,6),
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,2,0, 0,0,0,0, 1,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0),
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,2, 0,0,1,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0),

(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 2,0,0,1, 0,9,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0),
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,2,0,12, 1,0,0,0, 0,0,0,11, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0),
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,1,0, 0,1,0,0, 0,12,0,0, 0,0,0,0, 0,0,17,0),
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,1, 0,14,0,0, 3,0,18,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0),

(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 1,17,1,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0),
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,1,0,1, 13,0,0,0, 0,6,0,0, 0,0,0,0),
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,1,0, 1,0,0,0, 0,0,16,0, 0,0,0,0),
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,1, 1,15,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,13),

(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 1,1,8,0, 0,0,0,0, 0,0,0,10),
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,1,1,0, 4,8,0,0, 0,0,0,0),
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,1,6, 0,0,0,0, 0,0,0,13),
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,1, 1,0,0,0, 0,0,0,0),

(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 1,1,0,0, 0,0,0,0),
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,1,1,0, 3,0,0,19),
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,1,1, 0,0,19,0),
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,1, 1,0,0,4),

(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 1,23,0,0),
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,1,1,7),
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,1,1),
(0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,0, 0,0,0,1)
    
```

Рис. 2. Матрица сетевого оператора для вычисления математического выражения функции управления квадрокоптером

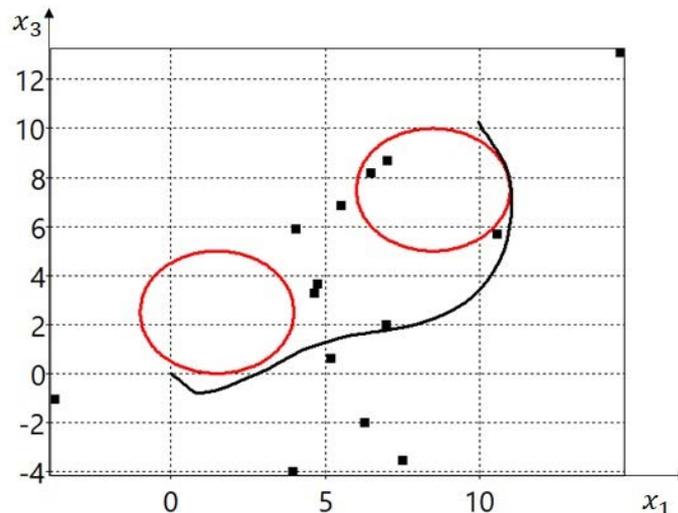


Рис. 3. Проекция движения квадрокоптера на горизонтальную плоскость. Черными квадратиками изображены проекции найденных управляющих точек равновесия

Заключение

Рассмотрена проблема реализации решения задачи оптимального управления. Показано, что для реализации решения необходимо сконструировать систему с обратной связью от состояния объекта управления. Формализованы свойства, которые приобретает система в результате введения системы стабилизации в обратной связи. Предложен принцип синтезированного управления для решения задачи оптимального управления с обратной связью. С помощью представленного подхода все этапы разработки системы управления реализуются автоматически на ЭВМ на основе классической математической постановки задачи. Подход является универсальным и не ограничивается определенными типами моделей объектов управления или функционалов качества управления. Можно утверждать, что данный подход является машинным обучением систем управления. Приведен пример решения задачи машинного обучения системы управления с обратной связью на основе принципа синтезированного оптимального управления для квадрокоптера.

Список литературы

1. Egerstedt M. Motion Planning and Control of Mobile Robots. Stockholm, Sweden : Thesis, Royal Institute of Technology, 2000.
2. Беллман Р. Динамическое программирование. М. : Издательство иностранной литературы, 1960. 400 с.
3. Jones M., Peet M. M. A generalization of Bellmans equation with application to path planning, obstacle avoidance and invariant set estimation // Automatica. 2021. Vol. 127. 109510.
4. Aguilar C. O., Krener A. J. Numerical solutions to the Bellman equation of optimal control // J. Optim. Theory Appl. 2014. Vol. 160. P. 527–552.
5. Fraga S. L., Pereira F. L. Hamilton-Jacobi-Bellman Equation and Feedback Synthesis for Impulsive Control // IEEE Trans. Autom. Control. 2012. Vol. 57. P. 244–249.
6. Liu D., Xue S., Zhao B. et al. Adaptive Dynamic Programming for Control: A Survey and Recent Advances // IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst. 2021. Vol. 51. P. 142–160.
7. Lewis F. L., Vrabie D., Vamvoudakis K. G. Reinforcement learning and feedback control: Using natural decision methods to design optimal adaptive controllers // IEEE Control Syst. 2012. Vol. 32. P. 76–105.
8. Болтянский В. Г. Математические методы оптимального управления. М. : Наука, 1969. 408 с.
9. Федоренко Р. П. Приближенное решение задач оптимального управления. М. : Наука, 1978. 488 с.
10. Walsh G., Tilbury D., Sastry S. et al. Stabilization of trajectories for systems with nonholonomic constraints // IEEE Trans. Autom. Control. 1994. Vol. 39. P. 216–222. doi: 10.1109/9.273373
11. Шмалько Е. Ю. Машинно-синтезированное управление нелинейным динамическим объектом на основе оптимального расположения точек равновесия // Информатика и автоматизация. 2023. Т. 22, № 1. С. 87–109.
12. Wang S., Dai M., Wang Y. Robust Adaptive Backstepping Sliding Mode Control for a Class of Uncertain Nonlinear System // Proceedings of the 2018 Chinese Automation Congress (CAC). Xi'an, China, 2018. P. 3534–3538. doi: 10.1109/CAC.2018.8623057

13. Clarke F. Lyapunov Functions and Feedback in Nonlinear Control // *Optimal Control, Stabilization and Nonsmooth Analysis* / ed. by M. S. de Queiroz, M. Malisoff, P. Wolenski. Berlin, Heidelberg, Germany : Springer, 2004. P. 267–282.
14. Уткин А. В., Уткин В. А. Синтез систем стабилизации при односторонних ограничениях на управляющие воздействия // *Проблемы управления*. 2020. № 3. С. 3–13.
15. Cherroun L., Nadour M., Kouzou A. Type-1 and Type-2 Fuzzy Logic Controllers for Autonomous Robotic Motion // *Proceedings of the 2019 International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics (ICAAD)*. Elazig, Turkey, 2019. P. 1–5.
16. Ahmed A. A., Alshandoli A. F. S. On replacing a PID controller with Neural Network controller for Segway // *Proceedings of the 2020 International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. Takamatsu, Japan, 2020. P. 1–4. doi: 10.1109/ICEE49691.2020.9249811
17. Diveev A. I. Shmalko E. Yu. Machine-Made Synthesis of Stabilization System by Modified Cartesian Genetic Programming // *IEEE Trans. Cybern.* 2022. Vol. 52. P. 6627–6637. doi: 10.1109/TCYB.2020.3039693
18. Румянцев Ю. А., Шмалько Е. Ю., Ямшанов К. Л. Синтез контроллера обратной связи методом сетевого оператора для мобильного робота Rosbot в имитационной среде Gazebo // *Вопросы теории безопасности и устойчивости систем*. 2022. № 24. С. 98–109.
19. Shmalko E., Diveev A. Control synthesis as machine learning control by symbolic regression methods // *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021. № 11(12).
20. Малкин И. Г. Теория устойчивости движения. 4-е изд. М. : URSS, 2017. 432 с.
21. Дивеев А. И., Шмалько Е. Ю. Метод синтезированного оптимального управления для группы роботов // *Надежность и качество сложных систем*. 2018. № 4. С. 40–47.
22. Shmalko E. Feasibility of Synthesized Optimal Control Approach on Model of Robotic System with Uncertainties // *Electromechanics and Robotics. Smart Innovation, Systems and Technologies* / ed. by A. Ronzhin, V. Shishlakov. Singapore : Springer, 2022. Vol. 232.
23. Diveev A., Shmalko E. Symbolic Regression Methods // *Machine Learning Control by Symbolic Regression*. Springer, Cham., 2021
24. Программный модуль сетевого оператора. URL: https://github.com/KostyaYamshanov/Machine-Learning-Control-kit/tree/main/network_operator
25. Шмалько Е. Ю., Румянцев Ю. А. Численное решение задачи оптимального управления методом роя частиц на основе нейросетевой модели // *Труды Международного симпозиума Надежность и качество*. 2022. Т. 1. С. 108–110.

References

1. Egerstedt M. *Motion Planning and Control of Mobile Robots*. Stockholm, Sweden: Thesis, Royal Institute of Technology, 2000.
2. Bellman R. *Dinamicheskoe programmirovaniye = Dynamic programming*. Moscow: Izdatel'stvo inostrannoy literatury, 1960:400. (In Russ.)
3. Jones M., Peet M.M. A generalization of Bellmans equation with application to path planning, obstacle avoidance and invariant set estimation. *Automatica*. 2021;127:109510.
4. Aguilar C.O., Krener A.J. Numerical solutions to the Bellman equation of optimal control. *J. Optim. Theory Appl.* 2014;160:527–552.
5. Fraga S.L., Pereira F.L. Hamilton-Jacobi-Bellman Equation and Feedback Synthesis for Impulsive Control. *IEEE Trans. Autom. Control*. 2012;57:244–249.
6. Liu D., Xue S., Zhao B. et al. Adaptive Dynamic Programming for Control: A Survey and Recent Advances. *IEEE Trans. Syst. Man, Cybern. Syst.* 2021;51:142–160.
7. Lewis F.L., Vrabie D., Vamvoudakis K.G. Reinforcement learning and feedback control: Using natural decision methods to design optimal adaptive controllers. *IEEE Control Syst.* 2012;32:76–105.
8. Boltyanskiy V.G. *Matematicheskie metody optimal'nogo upravleniya = Mathematical methods of optimal control*. Moscow: Nauka, 1969:408. (In Russ.)
9. Fedorenko R.P. *Priblizhennoe reshenie zadach optimal'nogo upravleniya = Approximate solution of optimal control problems*. Moscow: Nauka, 1978:488. (In Russ.)
10. Walsh G., Tilbury D., Sastry S. et al. Stabilization of trajectories for systems with nonholonomic constraints. *IEEE Trans. Autom. Control*. 1994;39:216–222. doi: 10.1109/9.273373
11. Shmal'ko E.Yu. Machine-synthesized control of a nonlinear dynamic object based on the optimal location of equilibrium points. *Informatika i avtomatizatsiya = Informatics and automation*. 2023;22(1):87–109. (In Russ.)
12. Wang S., Dai M., Wang Y. Robust Adaptive Backstepping Sliding Mode Control for a Class of Uncertain Nonlinear System. *Proceedings of the 2018 Chinese Automation Congress (CAC)*. Xi'an, China, 2018:3534–3538. doi: 10.1109/CAC.2018.8623057
13. Clarke F. Lyapunov Functions and Feedback in Nonlinear Control. *Optimal Control, Stabilization and Nonsmooth Analysis*. Berlin, Heidelberg, Germany: Springer, 2004:267–282.

14. Utkin A.V., Utkin V.A. Synthesis of stabilization systems with unilateral restrictions on control actions. *Problemy upravleniya = Management problems*. 2020;(3):3–13. (In Russ.)
15. Cherroun L., Nadour M., Kouzou A. Type-1 and Type-2 Fuzzy Logic Controllers for Autonomous Robotic Motion. *Proceedings of the 2019 International Conference on Applied Automation and Industrial Diagnostics (ICAAID)*. Elazig, Turkey, 2019:1–5.
16. Ahmed A.A., Alshandoli A.F.S. On replacing a PID controller with Neural Network controller for Segway. *Proceedings of the 2020 International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*. Takamatsu, Japan, 2020:1–4. doi: 10.1109/ICEE49691.2020.9249811
17. Diveev A.I., Shmalko E.Yu. Machine-Made Synthesis of Stabilization System by Modified Cartesian Genetic Programming. *IEEE Trans. Cybern.* 2022;52:6627–6637. doi: 10.1109/TCYB.2020.3039693
18. Romyantsev Yu.A., Shmal'ko E.Yu., Yamshanov K.L. Synthesis of a feedback controller by a network operator method for a mobile robot Rosbot in an imitation environment of Gazebo. *Voprosy teorii bezopasnosti i ustoychivosti system = Questions of the theory of safety and stability of systems*. 2022;(24):98–109. (In Russ.)
19. Shmalko E., Diveev A. Control synthesis as machine learning control by symbolic regression methods. *Applied Sciences (Switzerland)*. 2021;(11).
20. Malkin I.G. *Teoriya ustoychivosti dvizheniya = Theory of motion stability*. 4th ed. Moscow: URSS, 2017:432. (In Russ.)
21. Diveev A.I., Shmal'ko E.Yu. Method of synthesized optimal control for a group of robots. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2018;(4):40–47. (In Russ.)
22. Shmalko E. Feasibility of Synthesized Optimal Control Approach on Model of Robotic System with Uncertainties. *Electromechanics and Robotics. Smart Innovation, Systems and Technologies*. Singapore: Springer, 2022;232.
23. Diveev A., Shmalko E. Symbolic Regression Methods. *Machine Learning Control by Symbolic Regression*. Springer, Cham., 2021
24. *Programmnyy modul' setevogo operatora = The network operator's software module*. (In Russ.). Available at: https://github.com/KostyaYamshanov/Machine-Learning-Control-kit/tree/main/network_operator
25. Shmal'ko E.Yu., Romyantsev Yu.A. Numerical solution of the optimal control problem by the particle swarm method based on a neural network model. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2022;1:108–110. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Елизавета Юрьевна Шмалько

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник отдела управления
робототехническими устройствами,
Федеральный исследовательский центр
«Информатика и управление»
Российской академии наук (ФИЦ ИУ РАН)
(Россия, г. Москва, ул. Вавилова, 44);
доцент кафедры робототехнических
систем и мехатроники,
Московский государственный технический
университет имени Н. Э. Баумана
(Россия, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5)
E-mail: e.shmalko@gmail.ru

Elizaveta Yu. Shmalko

Candidate of technical sciences,
senior researcher of the sub-department
of control of robotic devices,
Federal Research Center
"Informatics and Management"
Russian Academy of Sciences (FITZ IU RAS)
(44 Vavilova street, Moscow, Russia);
associate professor of the sub-department
of robotic systems and mechatronics,
Bauman Moscow State Technical University
(5 2nd Baumanskaya street, Moscow, Russia)

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

Поступила в редакцию / Received 25.04.2023

Поступила после рецензирования / Revised 22.05.2023

Принята к публикации / Accepted 19.06.2023

ОЦЕНКИ ПОКАЗАТЕЛЯ ХЕРСТА НА МАЛЫХ ВЫБОРКАХ: ПРОСТЕЙШИЙ ВАРИАНТ НЕЛИНЕЙНОГО КОМПЕНСАТОРА МЕТОДИЧЕСКИХ ОШИБОК ФЕДЕРА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ДАННЫХ ЭКОНОМИКИ И БИОМЕТРИИ

А. И. Иванов¹, Д. В. Тарасов², К. А. Горбунов³

¹ Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт, Пенза, Россия

^{2,3} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ ivan@pniei.penza.ru, ² tarasovdv@mail.ru, ³ kirill.gorbunov@gmail.com

Аннотация. *Актуальность и цели.* В настоящее время показатель Херста достаточно легко интерпретируется применительно к биометрическим, медицинским и экономическим данным, однако его принято оценивать на больших выборках. Целью работы является устранение методической ошибки, возникающей из-за малых выборок реальных данных. *Материалы и методы.* Используется моделирование двумерного броуновского движения, порождающее возможность вычисления эталонных показателей Херста. Предложено средствами имитационного моделирования заранее строить нелинейный корректор методических ошибок, обнаруженных ранее Е. Федером. *Результаты и выводы.* Получена связь значения методических погрешностей оценки показателя Херста, позволяющая корректировать оценки при малых значениях показателя $H < 0,35$ и больших значениях показателя $H > 0,65$. Необходимость в корректировке методических ошибок растет по мере снижения объемов малых выборок реальных данных экономики и биометрии.

Ключевые слова: автокорреляционный функционал, показатель Херста, малые выборки, биометрические данные, методическая погрешность, корректор погрешности

Для цитирования: Иванов А. И., Тарасов Д. В., Горбунов К. А. Оценки показателя херста на малых выборках: простейший вариант нелинейного компенсатора методических ошибок федера при моделировании данных экономики и биометрии // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 50–54. doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-6

HURST EXPONENT ESTIMATES ON SMALL SAMPLES: THE SIMPLEST VERSION OF FEDER'S NON-LINEAR METHOD ERROR COMPENSATOR FOR MODELING ECONOMIC AND BIOMETRIC DATA

A.I. Ivanov¹, D.V. Tarasov², K.A. Gorbunov³

¹ Penza Research Electrotechnical Institute, Penza, Russia

^{2,3} Penza State University, Penza, Russia

¹ ivan@pniei.penza.ru, ² tarasovdv@mail.ru, ³ kirill.gorbunov@gmail.com

Abstract. *Background.* Currently, the Hurst exponent is quite easily interpreted in relation to biometric, medical and economic data, but it is customary to evaluate it on large samples. The aim of the work is to eliminate the methodological error that occurs due to small samples of real data. *Materials and methods.* The simulation of two-dimensional Brownian motion is used, which gives rise to the possibility of calculating the Hurst exponents. It is proposed by means of simulation modeling to build in advance a nonlinear corrector of methodological errors discovered earlier by E. Feder. *Results and conclusions.* A relation has been obtained for the value of methodological errors in estimating the Hurst exponent, which makes it possible to correct estimates for small values of the exponent $H < 0.35$ and large values of the exponent $H > 0.65$. The need to correct methodological errors is growing as the size of small samples of real economic and biometric data decreases.

Keywords: autocorrelation functional, Hurst exponent, small samples, biometric data, methodological error, error corrector

For citation: Ivanov A.I., Tarasov D.V., Gorbunov K.A. Hurst exponent estimates on small samples: the simplest version of Feder's non-linear method error compensator for modeling economic and biometric data. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(3):50–54. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-6

Введение

Показатель Херста является одним из активно используемых параметров при анализе рынка [1–3] и коллективной биометрии [4]. К сожалению, эмпирический показатель Херста по умолчанию предполагает использование больших выборок из-за того, что он является степенным:

$$\frac{R(N)}{\sigma(N)} = \left\{ \frac{\pi \cdot N}{2} \right\}^H, \quad (1)$$

где N – размер выборки; R – размах выборки; σ – стандартное отклонение выборки; H – степенной показатель Херста, изменяющийся в интервале от 0,5 до 1,0 для предсказуемых персистентных систем и изменяющийся в интервале от 0,0 до 0,5 для антиперсистентных систем.

Переходя в логарифмическую форму уравнения (1), получим еще один второй вариант записи показателя Херста:

$$H(N) = \log_2(R(N)/\sigma(N))/\log_2(\pi \cdot N/2). \quad (2)$$

Вторая форма удобна для пояснения причин, по которым при анализе данных рынков и данных коллективной биометрии необходимы большие выборки. Если предположить, что логарифм нормированного размаха данных является константой, то ошибка оценки показателя будет оцениваться следующим соотношением:

$$\Delta H(N) \approx \text{const}/\log_2(\pi \cdot N/2), \quad (3)$$

т.е. ошибки из-за сокращения размеров выборки реальных данных должны расти обратно пропорционально логарифму объема выборки.

Проведенные численные эксперименты показали, что наряду со случайной составляющей погрешности $\Delta H(N)$ оценки вида (2) содержат методическую составляющую погрешности, которая может быть устранена. Одной из первых работ, отмечающей наличие мультипликативной составляющей методической погрешности, является работа Е. Федера [5] при слишком низких и слишком больших значениях показателя Херста. Одним из первых попытался устранить мультипликативно погрешность Э. Нейман [6]. Работ о том, насколько эффективен мультипликативный корректор Э. Неймана [6], нами не обнаружено. Это и послужило толчком к выполнению данной работы по корректировке методической погрешности, выявленной Е. Федером [5].

Численное моделирование значений показателя Херста для малых выборок на эталонных шумах броуновского движения

Теория броуновских блужданий [2, 3, 5] позволяет связать коэффициент парной корреляции со значениями показателя Херста. Примеры случайных броуновских блужданий, соответствующих разным значениям показателя Херста, приведены на рис. 1.

Из теории следует, что при независимых данных, использованных для формирования броуновского блуждания, показатель Херста должен составлять $H \approx 0,5$ при $r(x, y) \approx 0,0$. В нашем случае для выборок объемом 32 опыта коэффициент парной корреляции должен вычисляться по следующей формуле:

$$r(x, y) = \frac{1}{32} \sum_{i=1}^{32} \frac{(x_i - E(x)) \cdot (y_i - E(y))}{\sigma(x) \cdot \sigma(y)}. \quad (4)$$

Кроме того, известно, что для $r(x, y) \approx -1,0$ показатель Херста должен составить минимальное значение $H \approx 0,0$. Напротив, для сильно коррелированных данных $r(x, y) \approx +1,0$ показатель должен принимать максимальное значение $H \approx 1,0$.

Моделирование предельных случаев минимального и максимального значения показателей Херста через использования программных генераторов псевдослучайных чисел невозможно. Однако возможно моделирование близких к предельным случайных блужданий для очень низких и очень больших значений показателей Херста. Возможность подобного моделирования иллюстрирует рис. 2.

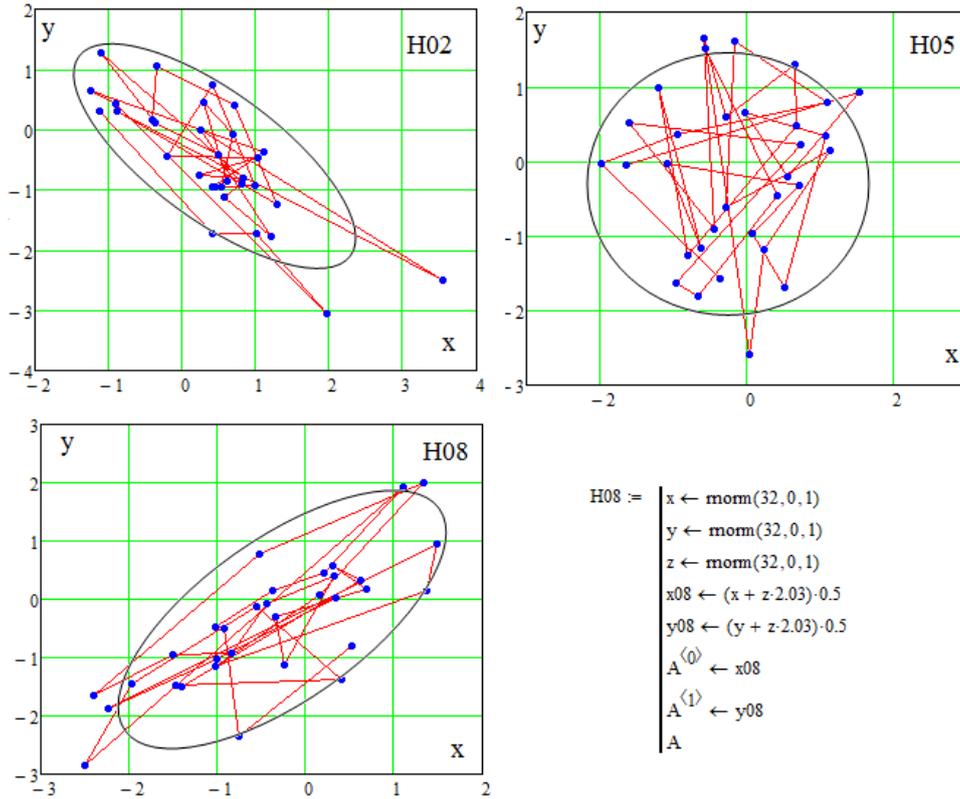


Рис. 1. Случайные броуновские блуждания, соответствующие разным значениям показателя Херста $H \approx 0,2$, $H \approx 0,5$, $H \approx 0,8$

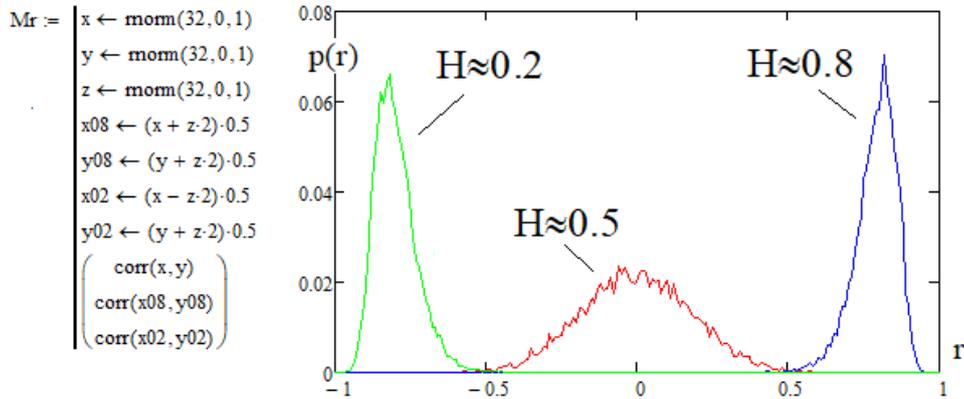


Рис. 2. Распределение данных при моделировании персистентного и антиперсистентного броуновского хаоса

Кусочно-линейная сшивка шкалы показателя Херста и шкалы двумерных коэффициентов корреляции $r(x, y)$

В силу того, что моделирование броуновских движений возможно в широких пределах, мы можем выполнить подобное моделирование и получить 11 точек взаимосвязи значений математических ожиданий показателя Херста и значений математических ожиданий коэффициентов парной корреляции. Это необходимо из-за того, чтобы устранить неопределенность, обусловленную случайными данными. На рис. 3 приведены точки, полученные численным моделированием.

Из рис. 3 видно, что Е. Федер [5] верно указал на необходимость корректировки связки шкал Херста с парным коэффициентом корреляции (4) на краях шкал. Формально сшивка шкал может быть выполнена кусочно-линейной аппроксимацией. В простейшем случае может быть использована аппроксимация, состоящая всего из трех участков линейного приближения:

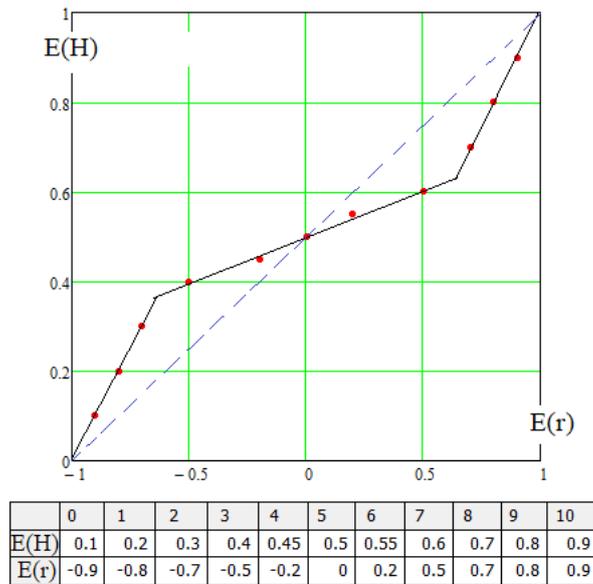


Рис. 3. Кусочно-линейное описание связи показателя Херста с коэффициентом парной корреляции броуновского движения

$$\begin{cases} H(r) = (1-r), & \text{если } r \leq -0,65, \\ H(r) = \frac{(2-r)}{4}, & \text{если } r \leq -0,65 \vee r < 0,65, \\ H(r) = r, & \text{если } r \geq 0,65. \end{cases} \quad (5)$$

Эта аппроксимация построена на двух точках $r(x, y) = \pm 0,65$, где происходит переход на крайние участки аномалий Е. Федерера с двойной крутизной наклона. Между этими крайними точками связь показателя с корреляцией в четыре раза меньшей крутизны, чем на краях диапазона. Простейшая (самая примитивная) линейная связь с неизменяемым наклоном двух сшиваемых показателей на рис. 3 отображена пунктиром.

Заключение

Таким образом, кусочно-линейная связь показателя Херста с классическим показателем двумерной корреляции оказывается очень простой в случае использования приближения тремя участками. При этом программная реализация приближения так же оказывается достаточно простой (5).

В статье рассматриваются два типа функционалов. Функционал Херста (2) и классический корреляционный функционал (4), который легко наблюдаем только при моделировании зависимых данных броуновскими блужданиями. При этом функционал Херста не чувствителен к знаку корреляционной связи. Если пользоваться только функционалом Херста, то персистентные и антиперсистентные временные ряды неразличимы $H \approx 0,2 \approx 0,8$; $H \approx 0,1 \approx 0,9$. В связи с этим актуальной становится задача восстановления знака корреляционной сцепленности эквивалентных броуновских блужданий по последовательности реально наблюдаемых данных экономики, медицины и биометрии. Особую остроту проблема оценки знака корреляционной сцепленности реальных данных, видимо, будет приобретать при оценках показателя Херста и иных автокорреляционных функционалов на малых выборках [7]. Чем меньше выборка, тем больше внимания нужно уделять компенсации методических погрешностей.

Список литературы

1. Калуж Ю. А., Логинов В. М. Показатель Херста и его скрытые свойства // Сибирский журнал индустриальной математики. 2002. Т. 5, вып. 4. С. 29–37.
2. Петерс Э. Хаос и порядок на рынках капитала. Новый аналитический взгляд на циклы, цены и изменчивость рынка / пер. с англ. В. И. Гусевой. М. : МИР, 2000. 333 с.

3. Мандельброт Б., Хадсон З. Л. (НЕ)послушные рынки. Фрактальная революция в финансах. М. ; СПб. ; Киев : Вильямс, 2006. 408 с.
4. Иванов А. И. Высокоразмерная коллективная биометрия подсознательного поведения людей на рынке и производстве : препринт. Пенза : Изд-во ПГУ, 2021. 60 с.
5. Федер Е. Фракталы. М. : Мир, 1991. 254 с.
6. Найман Э. Как покупать дешево и продавать дорого : пособие для разумного инвестора. М. : Альпина Паб-лишерз, 2011. 552 с.
7. Иванов А. И. Нейросетевой многокритериальный статистический анализ малых выборок. Проверка гипотезы независимости : справочник. Пенза : Изд-во ПГУ, 2022. 218 с.

References

1. Kalush Yu.A., Loginov V.M. The Hurst index and its hidden properties. *Sibirskiy zhurnal industrial'noy matematiki = Siberian Journal of Industrial Mathematics*. 2002;5(4):29–37. (In Russ.)
2. Peters E. *Khaos i poryadok na rynkakh kapitala. Novyy analiticheskiy vzglyad na tsikly, tseny i izmenchivost' rynka = Chaos and order in the capital markets. A new analytical view on cycles, prices and market variability*. Transl. from the English by V.I. Gusev. Moscow: MIR, 2000:333. (In Russ.)
3. Mandel'brot B., Khadson Z.L. (NE)poslushnye rynki. *Fraktal'naya revolyutsiya v finansakh = (NOT) obedient markets. Fractal revolution in finance*. Moscow; Saint Petersburg; Kiev: Vil'yams, 2006:408. (In Russ.)
4. Ivanov A.I. *Vysokorazmernaya kollektivnaya biometriya podsoznatel'nogo povedeniya lyudey na rynke i proizvodstve: preprint = High-dimensional collective biometrics of subconscious behavior of people in the market and production : preprint*. Penza: Izd-vo PGU, 2021:60. (In Russ.)
5. Feder E. *Fraktaly = Fractals*. Moscow: Mir, 1991:254. (In Russ.)
6. Nayman E. *Kak pokupat' deshevo i prodavat' dorogo: posobie dlya razumnogo investora = How to buy cheap and sell expensive : a guide for a reasonable investor*. Moscow: Al'pina Pablisherz, 2011:552. (In Russ.)
7. Ivanov A.I. *Neyrosetevoy mnogokriterial'nyy statisticheskiy analiz malykh vyborok. Proverka gipotezy nezavisimosti: spravochnik = Neural network multicriteria statistical analysis of small samples. Testing the independence hypothesis : a reference book*. Penza: Izd-vo PGU, 2022:218. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Иванович Иванов

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

Дмитрий Викторович Тарасов

кандидат технических наук,
доцент кафедры высшей и прикладной математики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: tarasovdv@mail.ru

Кирилл Андреевич Горбунов

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

Aleksandr I. Ivanov

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

Dmitriy V. Tarasov

Candidate of technical sciences,
associate professor of the sub-department
of higher and applied mathematics,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Kirill A. Gorbunov

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 16.04.2023

Поступила после рецензирования/Revised 15.05.2023

Принята к публикации/Accepted 13.06.2023

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

DESIGN AND TECHNOLOGY OF INSTRUMENTATION AND ELECTRONIC EQUIPMENT

УДК 681.586.2

doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-7

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В. Н. Пономарев¹, А. А. Трофимов², Д. В. Дерябин³, Е. А. Фокина⁴, А. А. Максов⁵

^{1, 2, 4, 5} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

³ Научно-исследовательский институт электронно-механических приборов, Пенза, Россия

¹ revik2296@gmail.com, ² alex.t1978@mail.ru, ³ info@niiemp.ru, ⁴ iit@pnzgu.ru, ⁵ maksov.01@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Роль и объем температурных измерений в современной технике чрезвычайно значительны, поэтому и весьма велико разнообразие самих задач температурных измерений. Температурные измерения – основа для изучения энергетических и прочностных характеристик агрегатов и систем, оптимизации их эффективности и надежности. К числу наиболее емких областей техники, характеризующихся исключительным разнообразием задач температурных измерений, относится ракетно-космическая техника. Она органично включает в себя большинство задач температурных измерений, решаемых в авиационной технике, общепромышленной технике и энергетике, надводном и подводном судостроении и других областях техники. Поэтому особенно актуально стоит вопрос по повышению требований к надежности, предъявляемых к изделиям ракетно-космической техники и их составным частям в условиях жесткой эксплуатации и внешних воздействий. *Материалы и методы.* В качестве метода исследования использовалось имитационное моделирование, при котором изучаемый датчик заменяется его моделью, с которой проводятся эксперименты с целью получения информации об этом объекте. В эксперименте применялось специализированное программное обеспечение Solidworks, позволяющее избежать дорогостоящих и длительных циклов испытаний. *Результаты.* В результате моделирования были получены эпюры полей распределения температур при критических температурах с целью исследования влияния данных условий на входящие в состав исследуемого объекта детали.

Ключевые слова: датчик температуры, имитационное моделирование, критические температуры

Для цитирования: Пономарев В. Н., Трофимов А. А., Дерябин Д. В., Фокина Е. А., Максов А. А. Проектирование датчика температуры методом имитационного моделирования // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 55–61. doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-7

DESIGN OF THE TEMPERATURE SENSOR BY SIMULATION MODELING

V.N. Ponomarev¹, A.A. Trofimov², D.V. Deryabin³, E.A. Fokina⁴, A.A. Maksov⁵^{1, 2, 4, 5} Penza State University, Penza, Russia³ Research Institute of Electronic and Mechanical Devices, Penza, Russia¹ revik2296@gmail.com, ² alex.t1978@mail.ru, ³ info@niiemp.ru, ⁴ iit@pnzgu.ru, ⁵ maksov.01@mail.ru

Abstract. *Background.* The role and scope of temperature measurements in modern technology is extremely significant, and therefore the diversity of the problems of temperature measurements themselves is very large. Temperature measurements are the basis for studying the energy and strength characteristics of units and systems, optimizing their efficiency and reliability. Rocket and space technology is one of the most capacious areas of technology, characterized by an exceptional variety of problems of temperature measurements. It organically includes most of the problems of temperature measurements solved in aviation technology, general industrial technology and power engineering, surface and underwater shipbuilding, and other areas of technology. Therefore, the issue of increasing the reliability requirements for products of rocket and space technology and their components under conditions of harsh operation and external influences is of particular relevance. *Materials and methods.* Simulation modeling was used as a research method, in which its model, with which experiments are carried out in order to obtain information about this object, replaces the studied sensor. In the experiment, specialized software Solidworks was used, which avoids expensive and lengthy test cycles. *Results.* As a result of the simulation, diagrams of the temperature distribution fields at critical temperatures were obtained in order to study the influence of these conditions on the parts included in the object under study.

Keywords: temperature sensor, simulation modeling, critical temperatures

For citation: Ponomarev V.N., Trofimov A.A., Deryabin D.V., Fokina E.A., Maksov A.A. Design of the temperature sensor by simulation modeling. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(3):55–61. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-7

Введение

Современные датчики как основные источники информации определяют уровень и технические характеристики информационно-измерительных и управляющих систем ракетно-космической техники, вооружения и военной техники [1, 2].

Для проверки физико-механических характеристик, надежности, быстродействия и других параметров датчиков зачастую приходится проводить технически сложные и дорогостоящие испытания. Расчеты указанных параметров датчиков-преобразующей аппаратуры (ДПА) аналитическим методом, проводимые до испытаний, в большинстве своем занимают месяцы и требуют от сотрудников специализированных навыков, поэтому провести аналитический расчет сборочной единицы сложной конфигурации перед проведением дорогостоящих испытаний затруднительно.

Современный подход к решению данной задачи предполагает использование синтеза CALS-технологий и систем автоматизированного проектирования (САПР). Данный подход заключается в построении компьютерной 3D-модели и проведении исследований с применением методов инженерного анализа [3–6]. Методы инженерного анализа основаны на построении адекватной математической модели объекта и предусматривают расчет динамических или статических режимов воздействия внешних факторов с помощью численных методов (чаще всего, метода конечных элементов). Кроме того, имитационное моделирование позволяет учитывать влияние комплексного воздействия внешних факторов, таких как давление, тепло, электрический ток и т.д., что в аналитическом расчете невозможно. Такие методы анализа позволяют определить оптимальные конструктивные и схематические параметры будущего изделия [3].

Основная часть

Задачей имитационного моделирования является определение теплопередачи при воздействии на датчик температуры критических температур + 300 °С и минус 253 °С с целью исследования влияния данного условия на входящие в состав исследуемого объекта детали и определение времени, за которое чувствительный элемент достигает измеряемой температуры [4].

В ходе моделирования была построена твердотельная модель, представленная на рис. 1. Граничные условия для имитационного моделирования: температура + 300 °С и минус 253 °С, время воздействия температуры 1400 с и место ее приложения. Граничные условия представлены на рис. 2. В табл. 1 и 2 приведены физико-механические свойства используемых материалов, необходимых для проведения анализа в модуле Simulation [5, 6].

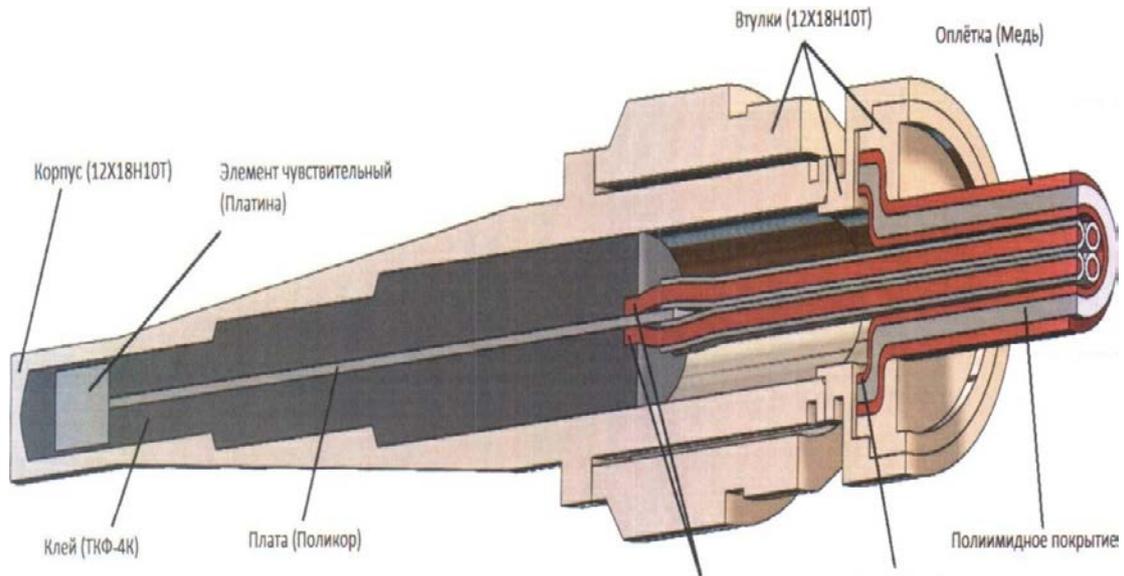


Рис. 1. Твердотельная модель датчика

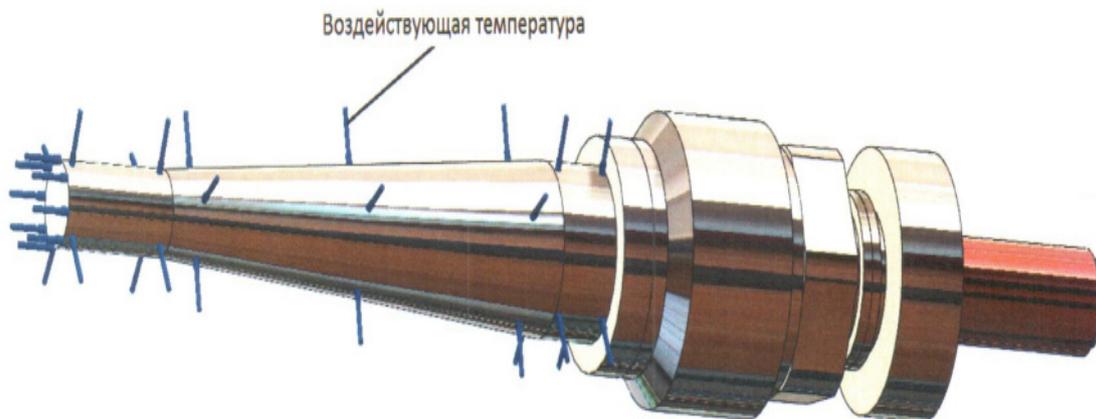


Рис. 2. Схема граничных условий

Таблица 1

Физико-механические свойства используемых материалов

Марка материала	12Х18Н10Т	ТКФ-4К	полико вк-94
Тип материала	Линейный– упругий – изотропный	Линейный – упругий – изотропный	Линейный– упругий – изотропный
Критерий прочности	Максимальное напряжение по Мизесу	Максимальное напряжение по Мизесу	Максимальное напряжение по Мизесу
Предел текучести	270 МПа	–	–
Модуль упругости	205 ГПа	–	–
Коэффициент Пуассона	0,28	–	–
Массовая плотность	7900 кг/м ³	2810 кг/м ³	3800 кг/м ³
Коэффициент теплового расширения	$1,66 \cdot 10^{-5}$ 1/к	$2 \cdot 10^{-6}$ 1/К	$8,5 \cdot 10^{-6}$ 1/К
Теплопроводность	15 Вт/(м · К)	0,1Вт/(м · К)	23 Вт/(м · К)
Удельная теплоемкость	462 Дж/(кг · К)	250 Дж/(кг · К)	120 Дж/(кг · К)

Таблица 2

Физико-механические свойства используемых материалов

Марка материала	Медь	Платина	Полиимид
Тип материала	Линейный – упругий – изотропный	Линейный – упругий – изотропный	Линейный – упругий – изотропный
Критерий прочности	Максимальное напряжение по Мизесу	Максимальное напряжение по Мизесу	Максимальное напряжение по Мизесу
Предел текучести	258,64 МПа	125 МПа	–
Модль Пгости	110 ГПа	167 ГПа	–
Коэффициент Пуассона	0,37	0,38	–
Массовая плотность	8900 кг/м ³	21450 кг/м ³	1900 кг/м ³
Коэффициент теплового расширения	$2,4 \cdot 10^{-5}$ 1/К	$8,8 \cdot 10^{-6}$ 1/К	$1,5 \cdot 10^{-5}$ 1/К
Теплопроводность	390 Вт/(м · К)	72 Вт/(м · К)	0,17 Вт/(м · К)
Удельная теплоемкость	390 Дж/(кг · К)	133 ж/(кг · К)	$10^{14}-10^{15}$ Дж/(кг · К)

Результаты исследования

В результате имитационного моделирования были получены и представлены на рис. 3 и 4 эпюры распределения температурных полей при воздействии на рабочую часть датчика температур + 300 °С и минус 253 °С в течение 25 и 10 с соответственно. На диаграммах 1–6 представлены графики зависимости температуры элемента чувствительного от времени ее воздействия. Исходя из рис. 3–6 видно, что чувствительный элемент датчика нагревается до температуры 300 °С за 12 с и охлаждается до температуры минус 253 °С за 14 с [7–9].

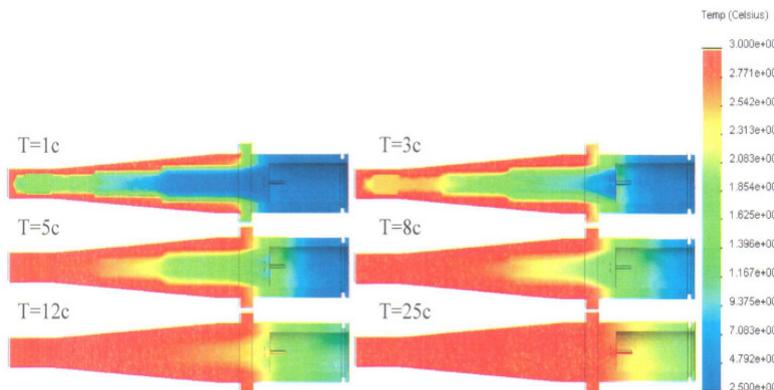


Рис. 3. Эпюра полей распределения температур при воздействии на рабочую часть датчика температуры + 300 °С в течение времени $T = 25$ с

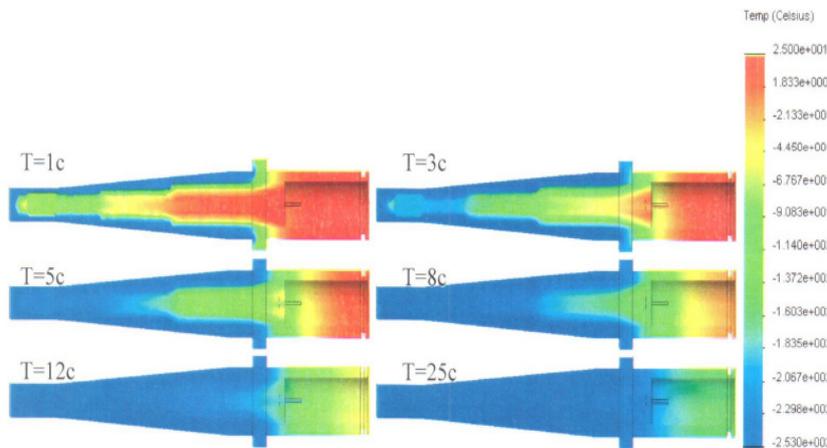


Рис. 4. Эпюра полей распределения температур при воздействии на рабочую часть датчика температуры минус 253 °С в течение времени $T = 25$ с

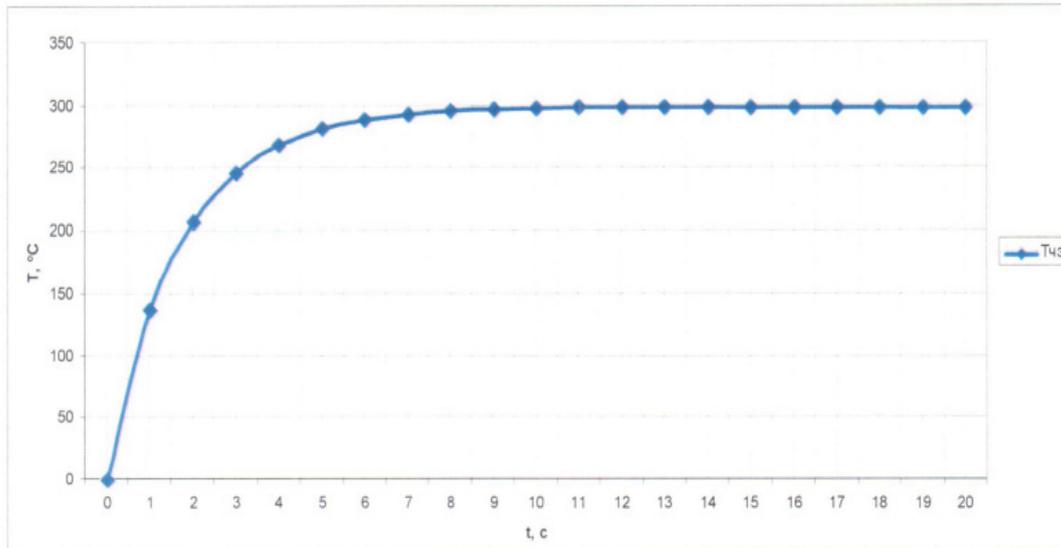


Рис. 5. График зависимости температуры элемента чувствительного ($T_{чз}$) от времени (t) при воздействии на датчик температуры $300\text{ }^{\circ}\text{C}$

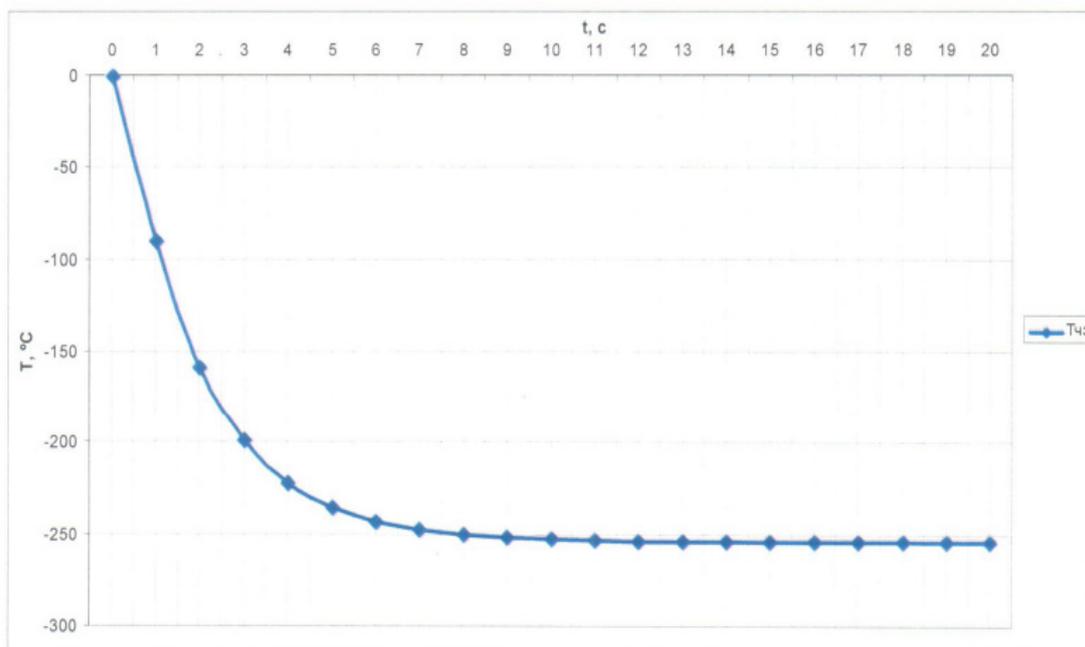


Рис. 6. График зависимости температуры элемента чувствительного ($T_{чз}$) от времени (t) при воздействии на датчик температуры $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$

Для определения времени термической реакции согласно ГОСТ 6651–2009 п. 8.10 было проведено моделирование датчика, при воздействии на его рабочую часть температуры $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Результат моделирования представлен на рис. 7.

Исходя из рис. 7, видно, что время термической реакции, т.е. время нагрева элемента чувствительного до температуры равной $63\text{ }^{\circ}\text{C}$ (до температуры равной 90 % от $70\text{ }^{\circ}\text{C}$) составляет 3 с, что является удовлетворительным результатом.

В результате моделирования были получены эпюры полей распределения температур (см. рис. 3 и 4) и диаграммы на рис. 5–7; было определено время нагрева/охлаждения элемента чувствительного до измеряемых температур $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$; было определено время термической реакции.

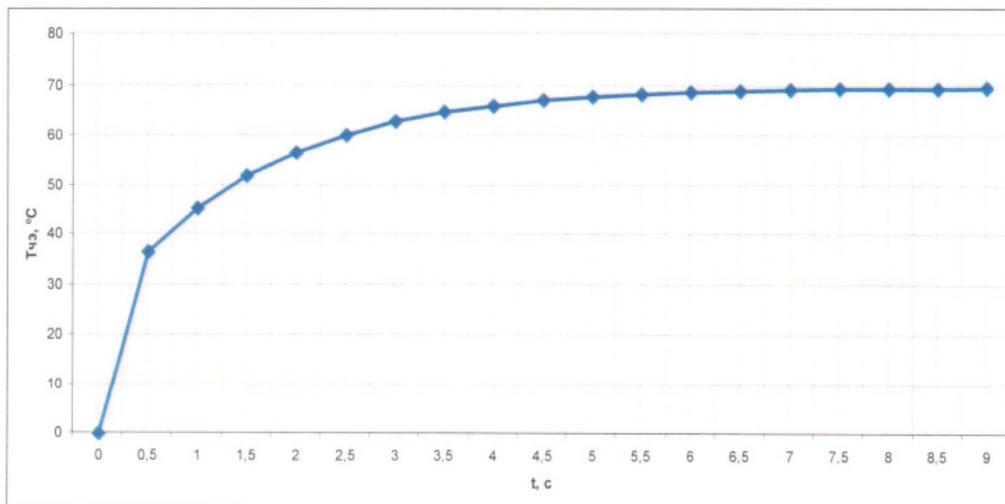


Рис. 7. График зависимости температуры элемента чувствительного ($T_{чз}$) от времени (t) при воздействии на датчик температуры $70\text{ }^{\circ}\text{C}$

Список литературы

1. Дмитриенко А. Г., Блинов А. В., Трофимов А. Н., Трофимов А. А. Тенденции развития датчиков, преобразователей и на их основе систем измерения, мониторинга и контроля технически сложных объектов ракетно-космической техники // Датчики и системы. 2012. № 9. С. 4–6.
2. Бастрыгин К. И., Трофимов А. А. Система измерения, мониторинга, контроля и диагностики параметров ракетного двигателя // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 3. С. 18–25.
3. Мусаев Р. Ш., Трофимов А. А., Фролов М. А. Имитационное моделирование чувствительного элемента датчика давления струнного типа // Датчики и системы. 2014. № 7. С. 22–25.
4. Мусаев Р. Ш., Трофимов А. А., Фролов М. А. Имитационное моделирование чувствительного элемента тензорезистивного датчика абсолютного давления // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2012. № 2. С. 51–55.
5. Алямовский А. А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. М. : ДМК Пресс, 2010. 464 с.
6. Рыбаков И. М. Модели и методы измерения электрических параметров в сложных системах электроники // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 44–50.
7. Перевертов В. П., Андрончев И. К., Юрков Н. К. Порошковые композиты и наноматериалы в гибких технологиях формообразования деталей // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 2. С. 85–95. doi: 10.21685/2307-4205-2020-2-9
8. Герасимов О. Н., Доросинский А. Ю., Березин М. Н. Исследование влияния воздействия вибрационных нагрузок на конструкционные материалы изделий электронной техники // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 3. С. 37–42. doi: 10.21685/2307-4205-2017-3-6
9. Разоренов А. Г., Медведев А. М. Электрохимическая модель отказов электроизоляционных конструкций из композиционных материалов // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 3. С. 11–14. doi: 10.21685/2307-4205-2016-3-2

References

1. Dmitrienko A.G., Blinov A.V., Trofimov A.N., Trofimov A.A. Trends in the development of sensors, transducers and measurement systems based on them, monitoring and control of technically complex objects of rocket and space technology. *Datchiki i sistemy = Sensors and system*. 2012;(9):4–6. (In Russ.)
2. Bastrygin K.I., Trofimov A.A. System of measurement, monitoring, control and diagnostics of rocket engine parameters. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2017;(3): 18–25. (In Russ.)
3. Musaev R.Sh., Trofimov A.A., Frolov M.A. Simulation modeling of a sensitive element of a string-type pressure sensor. *Datchiki i sistemy = Sensors and system*. 2014;(7):22–25. (In Russ.)
4. Musaev R.Sh., Trofimov A.A., Frolov M.A. Simulation modeling of a sensitive element of a strain-resistant absolute pressure sensor. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurement. Monitoring. Management. Control*. 2012;(2):51–55. (In Russ.)
5. Alyamovskiy A.A. *Inzhenernye raschety v SolidWorks Simulation = Engineering calculations in SolidWorks Simulation*. Moscow: DMK Press, 2010:464. (In Russ.)

6. Rybakov I.M. Models and methods of measuring electrical parameters in complex systems of electronics. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(2):44–50. (In Russ.)
7. Perevertov V.P., Andronchev I.K., Yurkov N.K. Powder composites and nanomaterials in flexible technologies of forming parts. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(2):85–95. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2020-2-9
8. Gerasimov O.N., Dorosinskiy A.Yu., Berezin M.N. Investigation of the impact of vibration loads on structural materials of electronic equipment products. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(3):37–42. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2017-3-6
9. Razorenov A.G., Medvedev A.M. Electrochemical model of failures of electrical insulating structures made of composite materials. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2016;(3):11–14. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2016-3-2

Информация об авторах / Information about the authors

Владислав Николаевич Пономарев

аспирант,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: revik2296@gmail.com

Vladislav N. Ponomarev

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

Алексей Анатольевич Трофимов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alex.t1978@mail.ru

Aleksei A. Trofimov

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Денис Викторович Дерябин

заместитель генерального директора по производству,
Научно-исследовательский институт
электронно-механических приборов
(Россия, г. Пенза, ул. Каракозова, 44)
E-mail: info@niiemp.ru

Denis V. Deryabin

Deputy production general manager,
Research Institute of Electronic and Mechanical Devices
(44 Karakozov street, Penza, Russia)

Екатерина Александровна Фокина

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

Ekaterina A. Fokina

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

Андрей Анатольевич Максов

студент,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: maksov.01@mail.ru

Andrey A. Maksov

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 24.07.2023

Поступила после рецензирования / Revised 21.08.2023

Принята к публикации / Accepted 18.09.2023

МОДЕЛЬ УПРУГОЙ ОБОЛОЧКИ В СИСТЕМЕ АРТЕРИЯ – МАНЖЕТА

В. Г. Полосин¹, С. И. Геращенко², М. С. Геращенко³, О. Е. Безбородова⁴

^{1, 2, 3, 4} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия
^{1, 2, 3} mpo@list.ru, ⁴ ot@pnzgu.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Окклюзивная манжета широко используется при неинвазивном измерении артериального давления. Механическое взаимодействие между артерией, тканями предплечья и манжетой являются фактором, потенциально влияющим на точность измерения систолического и диастолического давления. Для количественной оценки внутри манжетных напряжений, создаваемых компрессионной манжетой, необходимо проведение теоретических исследований с целью определения факторов, оказывающих существенное влияние на оценки артериального давления. *Материалы и методы.* В работе предложено при построении модели изменения геометрических размеров упругой оболочки от разницы давлений использовать тензоры напряжений и деформаций в виде трехмерных векторов нормальных и касательных компонент, что обеспечило компактность и прозрачность представления вывода основных уравнений. В результате проведенного исследования показано, что моделируемые деформации обладают высокой чувствительностью к распределению давления на внешней и внутренней поверхности цилиндрического сосуда. Более того, ткани сосуда испытывают объемное сжатие, вызывающее деформацию оболочки сосуда по толщине, и образование напряженного состояния тканей при отсутствии избыточного давления внутри сосуда. Так как для толстостенного сосуда площади внутренней и наружной поверхностей различны, в результате сжатия происходит фиксируемое в манжете смещение тканей из-за разности суммарных внешних сил. Модель позволяет демонстрировать деформацию сосуда и изменение его геометрических размеров под действием внешнего давления, приложенного к организму. *Результаты и выводы.* Проведенное исследование показывает, что на измерения артериального давления серьезное влияние могут оказывать нелинейные свойства модуля упругости оболочки артерии в моделях исследования при трансмуральном взаимодействии, основанном на использовании окклюзивной манжеты.

Ключевые слова: артериальное давление, модель упругой артерии, свойства тканей биологических оболочек, деформация оболочки, окклюзивная манжета

Для цитирования: Полосин В. Г., Геращенко С. И., Геращенко М. С., Безбородова О. Е. Модель упругой оболочки в системе артерия – манжета // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 62–73. doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-8

MODEL OF THE ELASTIC SHELL IN THE ARTERY – CUFF SYSTEM

V.G. Polosin¹, S.I. Gerashchenko², M.S. Gerashchenko³, O.E. Bezborodova⁴

^{1, 2, 3, 4} Penza State University, Penza, Russia
^{1, 2, 3} mpo@list.ru, ⁴ ot@pnzgu.ru

Abstract. *Background.* The occlusal cuff is widely used for non-invasive blood pressure measurement. The mechanical interaction between the artery, forearm tissue and cuff is a factor potentially affecting the accuracy of systolic and diastolic pressure measurements. *Materials and methods.* To quantify the intra-cuff stresses created by the compression cuff, it is necessary to conduct theoretical studies to determine the factors that have a significant impact on blood pressure estimates. In the work, it was proposed to use the stress and strain tensors in the form of three-dimensional vectors of normal and tangent components when building a model for changing the geometric dimensions of the elastic shell from pressure difference, which ensured the compactness and transparency of the representation of the derivation of basic equations. As a result of the study, it was shown that the simulated deformations are highly sensitive to the pressure distribution on the outer and inner surfaces of a cylindrical vessel. Moreover, vessel tissues experience volume compression, which causes deformation of the vessel shell in thickness and the formation of a stressed state of tissues in the absence of excessive pressure inside the vessel. Since for a thick-walled vessel, the areas of the inner and outer surfaces are different as a result of compression, a fixed displacement of the tissues occurs in the cuff, due to the difference in the total external forces. The model allows you to demonstrate the deformation of the vessel and the change in its geometric dimensions under the influence of external pressure applied to the body. *Results and conclusions.* The study shows that blood pressure measurements can be seriously influenced by the nonlinear properties of the elastic modulus of the arterial membrane in transmural interaction models based on the use of an occlusive cuff.

Keywords: blood pressure, elastic artery model, biological tissue properties, shell deformation, occlusive cuff

For citation: Polosin V.G., Gerashchenko S.I., Gerashchenko M.S., Bezborodova O.E. Model of the elastic shell in the artery – cuff system. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(3):62–73. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-8

Введение

Артериальное давление (АД) является одним из наиболее известных и распространенных медицинских показателей, используемых в быту и лечебных учреждениях. Особую значимость оценка АД имеет для лиц, страдающих выраженными формами нарушений сердечно-сосудистой системы [1]. В настоящее время достаточно востребованными являются тонометры осцилляторного типа, использующие для создания избыточного давления манжеты, накачиваемые воздухом. В основном они предназначены для оценки АД в бытовых условиях при самостоятельном контроле давления. Их неоспоримыми преимуществами являются: электронный способ измерения с цифровым и звуковым представлением информации, компактность, отсутствие дополнительных средств для прослушивания тонов, осуществление измерения в автоматическом режиме неподготовленными пользователями.

Принцип работы тонометров осцилляторного типа основан на изменении объема артерии под манжетой при прохождении пульсовой волны, вызывающей колебания давления в манжете (осцилляции). Изменение амплитуды осцилляций в процессе компрессии или декомпрессии служит основой для вычисления значений систолического и диастолического давлений.

Использование воздуха в качестве рабочего тела для преобразования изменения объема манжеты позволяет получать амплитуды пульсаций давления в манжете 1–2 мм рт. ст. Малая амплитуда осцилляций создает множество проблем при реализации алгоритмов обработки сигнала и вычислении значений давления. В целом это приводит к существенным погрешностям приборов данного класса. Их аттестация осуществляется на основании протоколов Британского гипертонического общества BHS [2], согласно которым устройство должно иметь по крайней мере 60 % измерений в пределах погрешности 5 мм рт. ст., 85 % измерений – в пределах погрешности 10 мм рт. ст. и 95 % – в пределах погрешности 15 мм рт. ст.

Увеличения амплитуды пульсаций удалось достичь за счет замены воздуха на жидкость [3]. Как показала практика использования гидроманжеты, амплитуда пульсаций составляет 40–50 % от вариации систолического и диастолического значений измеряемого давления и составляет 20–30 мм рт. ст. Это создает предпосылки для создания тонометров повышенной точности, способных решать задачи современных клинических рекомендаций по диагностике и лечению артериальной гипертензии, выявлению критических состояний сердечно-сосудистой системы, требующих достаточно высокой точности измерения артериального давления.

Механизм формирования пульсаций давления в окклюзивной гидроманжете существенным образом отличается от процессов, происходящих в манжете, заполненной воздухом. Одно из главных отличий формирования осцилляций заключается в механизме взаимодействия артерии, тканей предплечья и гидроманжеты. Поскольку жидкость несжимаема, то и объемы перечисленных элементов практически не меняются в процессе прохождения пульсовой волны в артерии под манжетой. Передача давления от внутренней стенки артерии к манжете осуществляется за счет упругих радиальных и угловых деформаций тканей артерий и манжеты.

Форма и динамические изменения амплитуды осцилляций в процессе компрессии или декомпрессии являются основой для реализации гидроманжетного метода и разработки алгоритмов оценки параметров, характеризующих состояние сердечно-сосудистой системы. Отсутствие теоретических знаний о процессе формирования осцилляций в гидроманжете не позволяет оптимизировать структуру гидроманжетных приборов, разрабатывать эффективные методики оценки гемодинамических параметров. В этой связи необходимы исследования физико-технических, математических и метрологических закономерностей функционирования гидроманжетных систем, позволяющих получить теоретические знания, необходимые для реализации гидроманжетной технологии формирования осцилляций.

В настоящей работе создана модель, позволяющая оценить механическую деформацию стенки сосуда при изменении давления на внутренней и внешней его поверхностях упругой цилиндрической модели сосуда. Построение взаимосвязей модели основано на представлении тензоров напряжений и деформаций в виде трехмерных векторов для нормальных и для касательных составляющих.

Биологические ткани относятся к композитным материалам, содержащим в своем составе компоненты твердых веществ и жидкостей. При рассмотрении фундаментальных механических свойств (упругости и вязкости) используются модели механики конденсированных сред. Базовые сведения для свойств биологических материалов можно найти в специальных руководствах по теории упругости и вязкости, например, в работах «Реология полимеров» авторов Виноградова Г. Б., Малкина А. Я. [4] и «Моделирование в биомеханике» Бегуна П. И., Афонина П. Н. [5].

Для изучения влияния механических свойств поверхностных биологических тканей и упругих свойств внутренней оболочки манжеты были построены математические модели в виде упрощенной цилиндрической геометрии для распределения мягких тканей и оболочек артерии [6, 9, 10]. В существующих моделях использовано предположение, что плечевая артерия представляет собой тонкостенную трубку, изолированную от окружающих несжимаемых тканей. В ряде исследований пренебрегается зависимостью механических свойств тканей, таких как вязкость, упругость, инертность и сжимаемость, от внешнего давления, что приводит к искажению результатов измерения. В этой связи актуальны исследования влияния механических свойств тканей на трансмуральную передачу давления. Основная задача исследования состоит в разработке упругой модели для оценки влияния изменения внешнего давления на механические свойства плечевой артерии и на осциллометрические измерения АД.

Упругость эластичных оболочек

Под действием внешних сил биологические оболочки деформируются, изменяя свою форму и объем. Механическая деформация стенки сосуда при изменении давления зависит от его структурных компонентов и от разницы давлений на внутренней и внешней его поверхностях [10]. Механические свойства сосуда как упругого резервуара зависят от состояния его оболочки, состоящей из коллагена, эластина и мышечной ткани. Различают упругие и пластичные деформации. При упругой деформации оболочка после снятия нагрузки полностью восстанавливает свою форму. Свойство тел сохранять остаточную деформацию после снятия нагрузки характеризуется пластичностью. Биологические оболочки обладают упруго-пластическими свойствами при больших напряжениях: в области малых напряжений биологические оболочки испытывают нелинейные упругие деформации сосудистой ткани, при превышении нагрузки некоторого значения в оболочке появляются остаточные деформации.

Упругие свойства материала сосуда также имеют явно выраженные нелинейные свойства. При малой разнице давления упругие свойства сосуда определены свойствами эластина, который может быть деформирован на 200...300 %. Модуль упругости эластина меняется от 0,1 до 0,6 МПа. При повышении разности давления свойства ткани определены коллагеном с высоким модулем упругости порядка 10...100 МПа и предельной деформацией 10 %. Процентный состав эластина и коллагена определяет ярко выраженную механическую нелинейность упругих свойств стенок сосудов.

Деформация произвольной оболочки

Под действием нагрузки оболочка деформируется и изменяет свою форму. Деформация тканей оболочки отражается с помощью смещения точек оболочки, заданного полем вектора полного перемещения точек $[u] = [u_1, u_2, u_3]$, где u_i – проекция вектора на ортогональные оси координат x_i . Для задания напряженного состояния деформированной оболочки используют симметричные тензоры второго ранга с шестью независимыми компонентами: тензор напряжений σ_{ij} и тензор деформаций ϵ_{ij} . В области нелинейных упругих деформаций оболочки напряжения в любой ее точке однозначно задано функцией деформации [11–13]:

$$\sigma_{ij} = \varphi_{ij}(\epsilon_{km}). \quad (1)$$

Для построения взаимосвязей упругих деформаций тензоры напряжений и деформации записаны в виде трехмерных векторов для нормальных и касательных составляющих напряжений ($[\sigma_n] = [\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}]^T$; $[\sigma_\tau] = [\sigma_{12}, \sigma_{23}, \sigma_{31}]^T$) и для нормальных и сдвиговых деформаций ($[\epsilon_n] = [\epsilon_{11}, \epsilon_{22}, \epsilon_{33}]^T$; $[\epsilon_\gamma] = [\epsilon_{12}, \epsilon_{23}, \epsilon_{31}]^T$). Здесь $[\sigma_n]$ – вектор нормальных напряжений к площадкам напряженностей, для которых направление векторов площадки и напряженности совпадают; $[\sigma_\tau]$ – вектор сдвиговых (касательных) напряжений, для которых направление векторов площадки и напряженности перпендикулярны; $[\epsilon_n]$ – вектор деформаций сжатия – растяжения; $[\epsilon_\gamma]$ – вектор деформаций сдвига.

Так как свойства изотропных материалов (тканей) не изменяются в зависимости от направлений, то такие материалы имеют одинаковый модуль упругости (модуль эластичности) E и коэффициент Пуассона ν во всех направлениях. Наиболее общая форма изотропных соотношений напряжений и деформаций имеет вид [14, 15]:

$$\begin{aligned} [\sigma_n] &= \lambda \cdot \left(1 + \left(\frac{1}{\nu} - 2 \right) [\delta] \right) \cdot [\varepsilon_v]; \\ [\sigma_\tau] &= \mu \cdot [\delta] \times [\varepsilon_\gamma]. \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $[\delta]$ – метрический тензор для символов Кронекера, определяемых скалярным произведением базисных векторов (\vec{e}_i, \vec{e}_j) : $\delta_{ij} = 1$ при условии $i = j$, $\delta_{ij} = 0$ при условии $i \neq j$; λ и μ – параметры Ламе:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{\nu E}{1 - \nu - 2\nu^2}, \\ \mu &= \frac{E}{2(1 + \nu)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Для упругих изотропных тел справедливы соотношения обобщенного закона Гука [11, 12, 14]:

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda\Theta\delta_{ij}, \quad (4)$$

где Θ – объемная деформация: $\Theta = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}$.

Компоненты напряженности σ_{ij} и их первые частные производные $\sigma_{ij,i}$ – непрерывные функции координат, связанные с объемными внешними силами тремя уравнениями равновесия

$$\sigma_{ij,j} + \rho F_i = 0, \quad (5)$$

где ρ – плотность материала оболочки.

Определение деформированного состояния оболочки заключается в том, что по перемещению точек u_i вычисляются линейные удлинения вдоль осей. Сдвиговые деформации равны половине суммарного изменения прямого угла между осями. В общем случае для построения взаимосвязи компонентов деформации и малых перемещений используют соотношения Коши:

$$\varepsilon_{ij} = 0,5 \cdot (u_{i,j} + u_{j,i}). \quad (6)$$

Совокупность уравнений (4), (5) и (6) позволяет получить решения для деформированного состояния упругой оболочки.

Модель артерии и оболочки манжеты

При моделировании передачи давления в окклюзивных системах артерии и внутренней оболочки манжеты объекты модели представлены в форме тонкостенных цилиндрических оболочек [10]. На рис. 1 дана модель образования упругих напряжений в сегменте сосуда, имеющего форму осесимметричной цилиндрической оболочки. Разница давления p_i на внутреннюю (*inside*) и давления p_o на наружную (*outside*) цилиндрические поверхности модели сосуда определяет появление сил натяжения T_2 в сосудистой оболочке. В связи с тем, что передача давления от артерии в манжету зависит от смещения поверхностей оболочки при изменении давления крови внутри артерии вследствие распространения пульсовой волны, для построения тракта передачи давления от артерии в манжету важна качественная и количественная оценка деформаций артерии с учетом ее нелинейных особенностей.

Задача оценки деформаций сосуда и напряжений в сосудистой оболочке решается на основе теории упругости. Для решения задачи использована цилиндрическая система координат, в которой направления компонентов вектора перемещений совпадают с направлениями базисных векторов $[u] = [u_1, u_2, u_3] = [u_r, u_\phi, u_z]$. В силу осевой симметрии модели артерии компоненты тензора деформаций и тензора напряжений также заданы через базисные векторы цилиндрической системы координат. Для компонент векторов деформаций сжатия–растяжения и деформаций сдвига в цилиндрической системе координат справедливы соотношения

$$[\boldsymbol{\varepsilon}_n] = [\varepsilon_{rr}, \varepsilon_{\varphi\varphi}, \varepsilon_{zz}]^T = [u_{r,r}, r^{-1}(u_{\varphi,\varphi} + u_r), u_{z,z}]^T, \quad (7)$$

$$[\boldsymbol{\varepsilon}_\gamma] = [\varepsilon_{r\varphi}, \varepsilon_{\varphi z}, \varepsilon_{rz}]^T = \frac{1}{2} [(r^{-1}u_{r,\varphi} + u_{\varphi,r} - r^{-1}u_\varphi), (u_{\varphi,r} + r^{-1}u_{z,\varphi}), (u_{z,r} + u_{r,z})]. \quad (8)$$

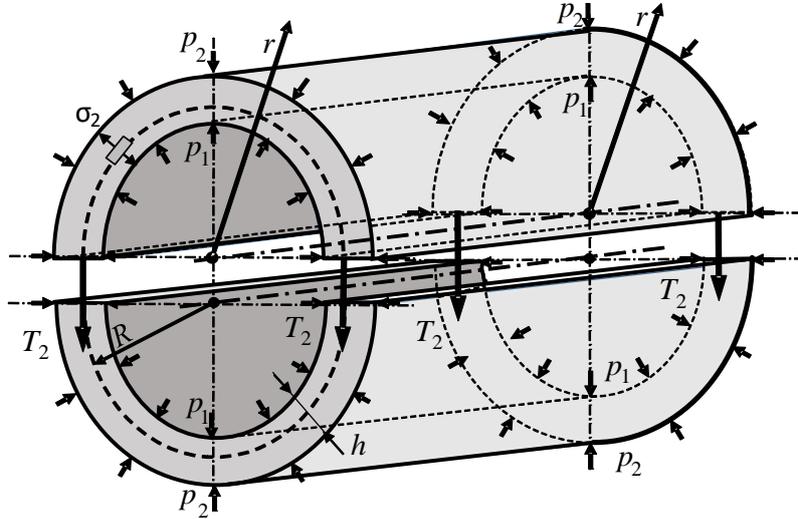


Рис. 1. Модель образования упругих напряжений в сегменте цилиндрической оболочки

Векторы нормальных и сдвиговых напряжений связаны с векторами деформаций сжатия–растяжения и деформаций сдвига законом Гука:

$$[\boldsymbol{\sigma}_n] = 2\mu[\boldsymbol{\varepsilon}_n] + \lambda\Theta; \quad (9)$$

$$[\boldsymbol{\sigma}_\tau] = 2\mu[\boldsymbol{\varepsilon}_\gamma], \quad (10)$$

где \$\Theta\$ – относительная объемная деформация: \$\Theta = \varepsilon_{rr} + \varepsilon_{\varphi\varphi} + \varepsilon_{zz}\$.

Уравнения равновесия для модели сосуда в цилиндрической системе координат имеют вид [11]

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial(r\sigma_{rr})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\sigma_{r\varphi})}{\partial \varphi} + \frac{\partial(\sigma_{rz})}{\partial z} + \frac{\sigma_{\varphi\varphi}}{r} \rho F_r &= 0, \\ \frac{1}{r^2} \frac{\partial(r^2\sigma_{r\varphi})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\sigma_{\varphi\varphi})}{\partial \varphi} + \frac{\partial(\sigma_{\varphi z})}{\partial z} + \rho F_\varphi &= 0, \\ \frac{1}{r} \frac{\partial(r\sigma_{rz})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\sigma_{\varphi z})}{\partial \varphi} + \frac{\partial(\sigma_{zz})}{\partial z} + \rho F_z &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь \$\rho\$ – удельная плотность биологических тканей артерии; \$F_r, F_\varphi, F_z\$ – компоненты вектора объемной силы.

Так как деформация цилиндрического сосуда определена разностью давлений на внутренней и наружной цилиндрических поверхностях сосуда, то для модели деформации справедлива осевая симметрия. В соответствии с законом Паскаля давление внутри сосуда изотропно и действует во всех направлениях одинаково. Вследствие того, что деформация стенок сосуда происходит только в радиальном направлении, все компоненты вектора сдвиговых деформаций равны нулю \$[\boldsymbol{\varepsilon}_\gamma] = [0, 0, 0]^T\$. Для вектора деформаций растяжения–сжатия сохраняются радиальная и угловая компоненты:

$$[\boldsymbol{\varepsilon}_n] = [u_{r,r}, (r^{-1}u_r), 0]^T. \quad (12)$$

Компонента в направлении оси \$z\$ принята равной нулю, так как в направлении оси симметрии не происходит перемещений точек цилиндрической модели оболочки.

Компоненты напряжений найдены в соответствии с законом Гука, записанным в векторной форме для нормальных (9) и сдвиговых (10) компонент. Так как компоненты сдвиговых деформаций

равны нулю, то из выражения (10) следует, что все компоненты сдвиговых напряжений также равны нулю: $[\sigma_{\tau}] = 2\mu[\epsilon_{\tau}] = [0, 0, 0]^T$. Путем замены компонент радиальных деформаций векторного выражения (9) с помощью радиальной компоненты перемещений (7) записан вектор нормальных деформаций через радиальные перемещения точек цилиндрической оболочки:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{rr} \\ \sigma_{\varphi\varphi} \\ \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\mu\epsilon_{rr} + \lambda(\epsilon_{rr} + \epsilon_{\varphi\varphi}) \\ 2\mu\epsilon_{\varphi\varphi} + \lambda(\epsilon_{rr} + \epsilon_{\varphi\varphi}) \\ \lambda(\epsilon_{rr} + \epsilon_{\varphi\varphi}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\lambda + 2\mu)u_{r,r} + \lambda ur^{-1} \\ (\lambda + 2\mu)ur^{-1} + \lambda u_{r,r} \\ \lambda(ur^{-1} + u_{r,r}) \end{bmatrix}. \quad (13)$$

Так как сдвиговые напряжения равны нулю, то уравнение равновесия для стенок сосуда (13) примет вид

$$\frac{\partial(r\sigma_{rr})}{\partial r} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\varphi\varphi}}{r} = 0. \quad (14)$$

В результате подстановки компонент нормальных напряжений (13) в выражение (14) после упрощения получено дифференциальное уравнение для вектора перемещений точек упругой цилиндрической оболочки:

$$\frac{d}{dr} \left(\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (ru_r) \right) = 0. \quad (15)$$

На решение дифференциального уравнения (15) накладываются граничные условия в форме равенств напряжений и давлений на внутренней и внешней цилиндрических поверхностях артерии. Накладываемые граничные условия имеют вид

$$\begin{aligned} \sigma_{rr}(R_i) &= -p_i, \\ \sigma_{rr}(R_o) &= p_o. \end{aligned} \quad (16)$$

Положительное и отрицательное значения давлений в правой части граничных условий (16) учитывают направления компонент радиальных напряжений, которые компенсируют внешнее давление. Так как точки упругой цилиндрической оболочки под действием симметрично приложенного давления смещаются в направлении радиус-вектора, решение дифференциального уравнения (15) имеет только радиальную составляющую вектора перемещений. Угловая и осевая составляющие перемещений равны нулю. Общее решение однородного дифференциального уравнения (15) для перемещений $u(r)$ точек упругой цилиндрической оболочки имеет вид

$$u_r(r) = 0,5 \cdot C_1 r + C_2 r^{-1}, \quad (17)$$

где C_1 и C_2 – коэффициенты решения.

С учетом общего решения (17) формула для расчета компоненты радиальной напряженности в оболочке примет вид

$$\sigma_{rr} = C_1(\lambda + \mu) - 2\mu C_2 r^{-2}. \quad (18)$$

Система уравнений для определения коэффициентов C_1 и C_2 получена наложением граничных условий (16) на решение для компоненты радиальной напряженности (18). Система уравнений имеет вид

$$\begin{cases} v^{-1}\lambda(C_1(v + \mu\lambda^{-1}v) - (1 - 2v)C_2R_i^{-2}) = -p_i; \\ v^{-1}\lambda(C_1(v + \mu\lambda^{-1}v) - (1 - 2v)C_2R_o^{-2}) = p_o. \end{cases} \quad (19)$$

Из решения системы уравнений (19) получены формулы для вычисления коэффициентов C_1 и C_2 решения (15):

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{1}{(\lambda + \mu)} \frac{(p_o R_o^2 + p_i R_i^2)}{(R_o^2 - R_i^2)}, \\ C_2 &= \frac{v}{\lambda(1 - 2v)} \frac{R_i^2 R_o^2 (p_o + p_i)}{(R_o^2 - R_i^2)}. \end{aligned} \quad (20)$$

Путем подстановки постоянных (20) в общее решение однородного дифференциального уравнения (17) для перемещений точек упругой цилиндрической оболочки и замены параметров Ламе в соответствии с формулами (3) получено выражение для расчета перемещений точек модели артерии и оболочки манжеты при действии давлений p_0 и p_1 :

$$u_r(r) = \frac{1+\nu}{E} \frac{1}{R_o^2 - R_i^2} \left((1-2\nu)(p_o R_o^2 + p_i R_i^2)r + R_i^2 \cdot R_o^2 \cdot (p_o + p_i) \frac{1}{r} \right). \quad (21)$$

Радиальная и угловая компоненты вектора деформаций растяжения–сжатия (12) содержат две составляющие, выраженные через радиальную компоненту перемещений точек модели артерии и оболочки манжеты. Для расчета вектор деформаций удобно представить в форме

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{rr} \\ \varepsilon_{\varphi\varphi} \end{bmatrix} = \frac{1+\nu}{E} \frac{1}{(R_o^2 - R_i^2)} \begin{bmatrix} (1-2\nu) & -1 \\ (1-2\nu) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_o R_o^2 + p_i R_i^2 \\ R_i^2 \cdot R_o^2 \cdot (p_o + p_i) \cdot r^{-2} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

Общее решение для компонент вектора нормальных напряжений (13) также удобно записать в форме матричного выражения, выполнив подстановку компонент вектора деформаций (22) в выражение для вектора напряжений (13):

$$\begin{bmatrix} \sigma_{rr} \\ \sigma_{\varphi\varphi} \\ \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \frac{1}{R_o^2 - R_i^2} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & -1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_o R_o^2 + p_i R_i^2 \\ R_i^2 R_o^2 (p_o + p_i) r^{-2} \end{bmatrix}. \quad (23)$$

Из выражений для перемещения точек цилиндра (22) и вектора деформации (23) следует, что при нормальном атмосферном давлении упругая оболочка находится в деформированном состоянии, которое обусловлено воздействием давления на внутреннюю и наружную поверхность. Так как при моделировании упругих свойств заложено условие упругости оболочки, то при снятии давления оболочка деформируется до размеров, которые соответствуют упругой оболочке при отсутствии внешней нагрузки. Этому состоянию соответствуют радиусы R_o и R_i , для которых используется термин «собственные радиусы». Для вычисления радиальных координат r точек ненагруженной цилиндрической модели сосуда и оболочки манжеты относительно радиальных координат r^* тех же точек оболочки нагруженной атмосферным давлением использовано выражение вида

$$r + u_r(r) = r^*. \quad (24)$$

Особенность составляющих состоит в том, что векторы имеют одинаковые слагаемые, входящие с разными знаками. Радиальная и угловая деформации линейно изменяются от приращения давления. Если внешнее и внутреннее давление равны, то под действием внешних давлений упругий сосуд деформируется и его размеры изменяются. Выражение (23) иллюстрирует, что компоненты вектора нормальных напряжений при условии равновесия полностью определены начальными размерами оболочки и давлениями на ее поверхностях.

Деформации, наблюдаемые при проведении эксперимента, оцениваются как разность деформаций, рассчитанных на основе модели в нагруженном состоянии при избыточном давлении на внутренней поверхности сосуда, и деформаций, получаемых с помощью модели при нагрузке только атмосферного давления. Формула для расчета вектора деформаций под действием разницы давлений Δp_i имеет вид

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{rr}^* \\ \varepsilon_{\varphi\varphi}^* \end{bmatrix} = \frac{1+\nu}{E} \frac{1}{(R_o^2 - R_i^2)} \begin{bmatrix} (1-2\nu) & -1 \\ (1-2\nu) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_i^2 \\ R_i^2 \cdot R_o^2 \cdot r^{-2} \end{bmatrix} \Delta p_i, \quad (25)$$

где ε_{rr}^* и $\varepsilon_{\varphi\varphi}^*$ – компоненты радиальной и угловой деформаций оболочки под действием избыточного давлением Δp_i на внутренней поверхности сосуда. Давление на внутренней поверхности p_i поддерживается равным сумме давления на внешней поверхности p_o и избыточного давления Δp_i :

$$p_i = p_o + \Delta p_i. \quad (26)$$

Записанное выражение для деформаций растяжения–сжатия упругой модели (25) имеет классическую форму деформаций цилиндрического сосуда, согласно которой деформации растяжения–сжатия пропорциональны разнице давлений на внутренней и наружной поверхностях модели сосуда.

Результаты моделирования упругих свойств артерии

Для демонстрации особенностей и эффектов, полученных на основе модели упругого цилиндрического сосуда, в работе произведены расчеты для сонной артерии. При моделировании использованы типичные параметры для артерии [5]: диаметр сосуда – 25 мм, 8,2 мм и 4,15 мм; толщина сосуда – 0,4 мм, 0,16 мм и 0,12 мм; модуль нормальной упругости E для стенки – 0,9 МПа; коэффициент Пуассона 0,35; внутреннее избыточное давление – 2,4·9,6 кПа, допустимые напряжения – 0,93 МПа. При моделировании учитывается, что параметры сонной артерии полученные при нормальном атмосферном давлении равном $1,014 \cdot 10^5$ Па.

Поскольку размеры оболочки были измерены при атмосферном давлении, то собственные геометрические размеры модели определены через размеры оболочки, на которую воздействует нормальное атмосферное давление. Для определения собственных геометрических размеров модели используется преобразование координат (24) для точек нагруженного и ненагруженного сосуда. Значения собственных внутреннего R_0 и внешнего R_i радиусов для модели сонной артерии приняты равными 1,77 мм и 2,14 мм соответственно. Собственные параметры модели являются основными при определении перемещений точек, деформаций и напряжений оболочки. Характерные результаты расчета перемещений точек u_r упругих оболочек в зависимости от давления, действующим на внутреннюю поверхность оболочки при избыточном давлении Δp_i в 9,6 кПа, показан на рис. 2,а где линия 1 и линия 2 соответствуют перемещениям точек, расположенным на внутренней и наружной поверхностях модели. Пунктирные линии иллюстрируют перемещениям точек при избыточном давлении Δp_i в 16,2 кПа, характерного для систолы. Из графиков зависимостей перемещений на рис. 2 можно видеть, что перемещения точек оболочки при нормальном давлении составило 1,5...2 мм, что сопоставимо с собственными радиусами цилиндрической модели. Изменение геометрических размеров артерии в зависимости от внешнего давления иллюстрирует рис. 2,б, где изменения внешнего и внутреннего радиусов сосуда показано линиями 1 и 2 соответственно. Увеличение геометрических размеров происходит за счет уменьшения толщины стенок сосуда h (линия 3). Так как деформация – это важнейшая характеристика упругой оболочки, то для наложения ограничений на область допустимых геометрических размеров оболочки задан диапазон возможных деформаций состояния упругой обмотки равным 20 %. Это соответствует изменениям, при которых проявляется нелинейное увеличение модуля упругости для коллагеновых волокон приблизительно на порядок. Характерный пример деформаций, рассчитанных с помощью модели упругого цилиндрического сосуда для сонной артерии, показан на рис. 3, где цифрами обозначены: 1 и 2 – радиальная и угловая компоненты деформации наружной поверхности оболочки; 3 и 4 – радиальная и угловая компоненты деформации внутренней поверхности оболочки.

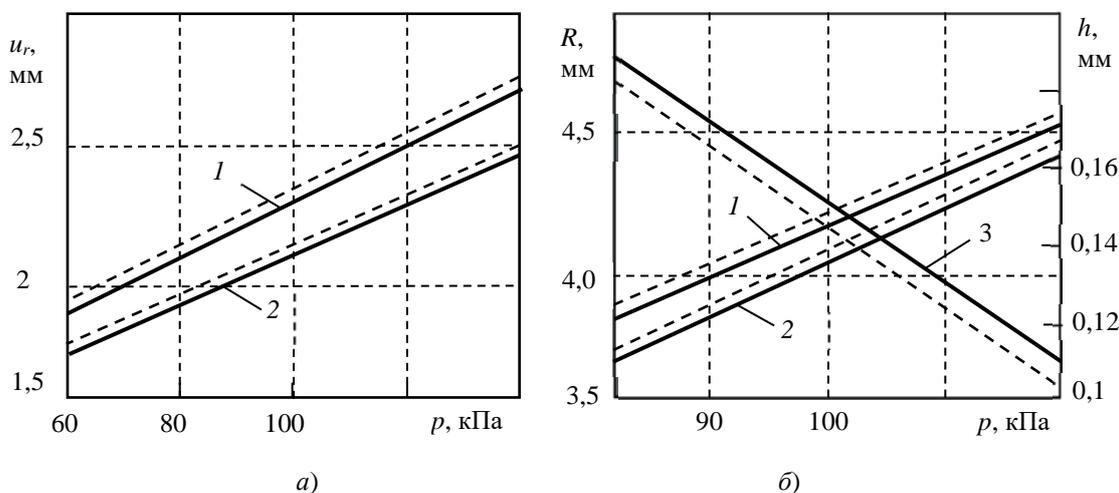


Рис. 2. Графики зависимости перемещений точек упругой артерии от изменения внешнего давления при избыточном давлении на внутренней поверхности в 9,6 кПа (сплошная линия) и в 16,2 кПа (пунктирная линия).

Образование тканей биологических объектов происходит при атмосферных давлениях. В этих условиях формируется оболочка, содержащая молекулярные структуры волокон коллагена и эластина, которая постоянно компенсирует внешнее давление в 1 атм. Особенность структуры состоит в том, что ее упругая деформация находится в области, где свойства оболочки изменяются относительно устойчивого состояния. В этой области структура обладает минимальным значением модуля упругости, которое проявляется при исследовании упругих свойств тканей. Пунктирные линии иллюстрируют смещение компонент деформации во время систолы. Избыточное систолическое давление принято равным 16,2 кПа [17].

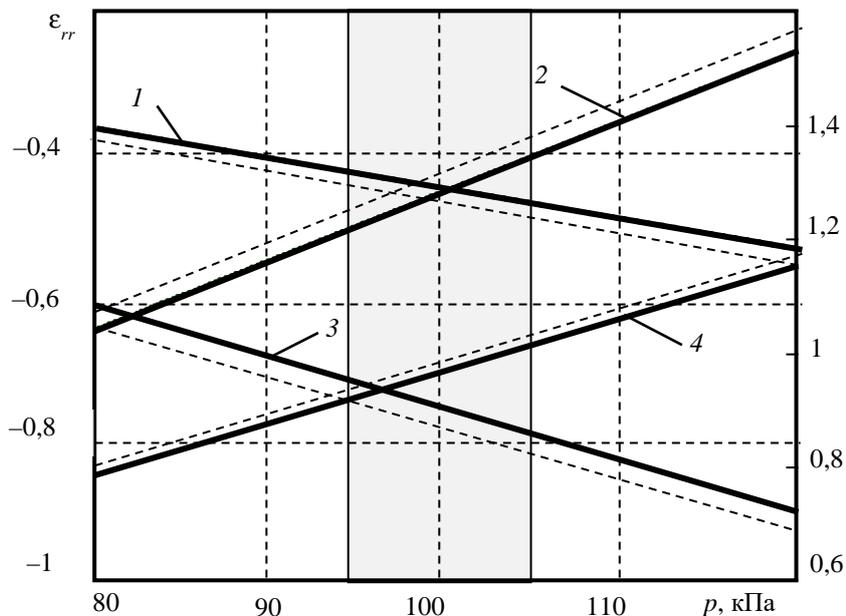


Рис. 3. Радиальные и угловые компоненты деформации на внутренней и наружной поверхностях модели сонной артерии

При деформации сосудистой оболочки происходит смещение коллагеновых волокон относительно их устойчивого состояния. В результате смещения коллагеновых волокон при деформации сосудистых оболочек на 20 % происходит увеличение модуля упругости на порядок, что накладывает ограничения на область возможных деформаций стенок артерий и сосудов [18]. В этой связи на применение модели упругого цилиндрического сосуда наложено ограничение, согласно которому для практических целей имеет значение только область деформаций оболочки вблизи состояния равновесия, при котором деформации не превышают 5 %. На рис. 3 выделена область допустимых деформаций серым цветом. В этой области изменения параметров модели пренебрежимо малы.

Заключение

Очевидно, что при наличии давления на внешней и внутренней поверхности цилиндрического сосуда наблюдаются два эффекта. Первый эффект состоит в том, что ткани сосуда испытывают объемное сжатие, что приводит к сжатию оболочки сосуда по толщине. Второй эффект состоит в том, что для толстостенного сосуда площади внутренней и наружной поверхностей сосуда различны, что приводит к смещению тканей в результате его сжатия из-за разности суммарных внешних сил. Эффекты проявляются как для сжимаемой, так и несжимаемой по объему оболочки. Коэффициент Пуассона ν принят равным 0,35 и 0,5 при моделировании сжимаемой и несжимаемой оболочки, соответственно.

Для иллюстрации эффектов были получены выражения (21) и (22) для смещения точек внешней и внутренней поверхности сосуда и для деформации материалов под действием давлений на внешней и внутренней поверхностях модели. Если в модели принять внутренний и внешний радиусы оболочки равными, т.е. неразличимыми при измерении, то решения не существует. Толщина оболочки стремится к нулю $h \rightarrow 0$ при условии, что радиус оболочки стремится к бесконечности: $R_i \rightarrow \infty$. При любой

конечной толщине оболочки и равенстве внутреннего и внешнего радиусов нарушена осевая симметрия модели. В этом случае для анализа поведения оболочки следует отказаться от условия радиальной симметрии и использовать другую модель, к примеру, модель плоскости.

Таким образом, проведенное исследование показывает, что на измерения артериального давления могут оказывать серьезное влияние нелинейные свойства модуля упругости оболочки артерии в моделях исследования при трансмуральном взаимодействии, основанном на использовании окклюзивной манжеты. В этой связи перспективными являются исследования, связанные с установлением влияния на оболочку артерии внешнего давления с учетом нелинейности модуля упругости ее стенок.

Список литературы

1. Jordan D., Marshall J. CNS integration of cardiovascular regulation // *Cardiovascular Regulation*. London : Portland Press on behalf of the Physiological Society, 1995. P. 1–14.
2. O'Brien E., Petrie J., Littler W. et al. The British Hypertension Society protocol for the evaluation of automated and semi-automated blood pressure measuring devices with special reference to ambulatory systems // *Journal of hypertension*. 1990. № 8. P. 607–619. PMID: 216845
3. Пат. 2652070, МПК А61В 5/0225. Электронный тонометр / Геращенко С. И., Геращенко М. С. № 2017117129 ; заявл. 16.05.2017 ; зарег. 24.04.2018.
4. Виноградов Г. Б., Малкин А. Я. Реология полимеров. М. : Химия, 1977. 440 с.
5. Бегун П. И., Афонин П. Н. Моделирование в биомеханике. М. : Высш. шк., 2004. 390 с.
6. Wang Jia-Jung, Liu Shing-Hong, Lin Chin-Teng, Hsieh Jui-Hsaing. Modeling the Arterial Unloaded Situation in Oscillometric Blood Pressure Waveform Measurement Using Fuzzy Logic Control // *Journal of Medical and Biological Engineering*. 2001. Vol. 21. P. 93–104.
7. Komine H., Asai Y., Yokoi T., Yoshizawa M. Non-invasive assessment of arterial stiffness using oscillometric blood pressure measurement // *BioMedical Engineering OnLine*. 2012. № 11. URL: <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/11/1/6>
8. Forouzanfar M., Dajani H. R., Groza V. Z. et al. Oscillometric Blood Pressure Estimation: Past, Present, and Future // *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*. 2015. Vol. 8. P. 44–63.
9. Liu Yi, Dang C., Garcia M. et al. Surrounding tissues affect the passive mechanics of the vessel wall: theory and experiment // *Am J Physiol Heart Circ Physiol*. 2007. № 293. H3290–H3300. doi: 10.1152/ajpheart.00666.2007
10. Lan H., Al-Jumaily A. M., Lowe A., Hing W. Effect of tissue mechanical properties on cuff-based blood pressure measurements // *Medical Engineering & Physics*. 2011. Vol. 33. P. 1287–1292.
11. Горшков А. Г., Старовойский Э. И., Яровая А. В. Механика слоистых вязкоупругопластичных элементов конструкции. М. : Физматлит, 2005. 576 с.
12. Бузухов Н. И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. М. : Высш. шк., 1961. 532 с.
13. Теребушко О. И. Основы теории упругости и пластичности. М. : Наука, 1984. 320 с.
14. Самуль В. И. Основы теории упругости и пластичности. М. : Высш. шк., 1982. 264.
15. Вардаян Г. С., Андреев В. И., Атаров Н. М., Горшков А. А. Соппротивление материалов с основами теории упругости и пластичности. М. : Изд-во АСБ, 1995. 568 с.
16. Волкова Н. А. Алгоритм диагностики состояния сердечно-сосудистой системы по результатам многократных измерений артериального давления и пульса // *Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки*. 2015. № 1. С. 43–49.
17. Геращенко С. И., Геращенко С. М., Костенков С. Ю. [и др.]. Препарирование изображений процесса формирования костного регенерата при настройке сканирующих электронных микроскопов // *Надежность и качество сложных систем*. 2016. № 4. С. 82–91. doi: 10.21685/2307-4205-2016-4-12
18. Люминарский И. Е., Люминарская Е. С. Динамическая модель микропереключателей с упругими стержневыми элементами // *Надежность и качество сложных систем*. 2016. № 4. С. 35–42. doi: 10.21685/2307-4205-2016-4-5

References

1. Jordan D., Marshall J. CNS integration of cardiovascular regulation. *Cardiovascular Regulation*. London: Portland Press on behalf of the Physiological Society, 1995:1–14.
2. O'Brien E., Petrie J., Littler W. et al. The British Hypertension Society protocol for the evaluation of automated and semi-automated blood pressure measuring devices with special reference to ambulatory systems. *Journal of hypertension*. 1990;(8):607–619. PMID: 216845
3. Pat. 2652070, МПК А61В 5/0225. Electronic tonometer. Gerashchenko S.I., Gerashchenko M.S. № 2017117129; appl. 16.05.2017; reg. 24.04.2018. (In Russ.)
4. Vinogradov G.B., Malkin A.Ya. *Reologiya polimerov = Rheology of polymers*. Moscow: Khimiya, 1977:440. (In Russ.)

5. Begun P.I., Afonin P.N. *Modelirovanie v biomekhanike = Modeling in biomechanics*. Moscow: Vyssh. shk., 2004:390. (In Russ.)
6. Wang Jia-Jung, Liu Shing-Hong, Lin Chin-Teng, Hsieh Jui-Hsaing. Modeling the Arterial Unloaded Situation in Oscillometric Blood Pressure Waveform Measurement Using Fuzzy Logic Control. *Journal of Medical and Biological Engineering*. 2001;21:93–104.
7. Komine N., Asai Y., Yokoi T., Yoshizawa M. Non-invasive assessment of arterial stiffness using oscillometric blood pressure measurement. *BioMedical Engineering OnLine*. 2012;(11). Available at: <http://www.biomedical-engineering-online.com/content/11/1/6>
8. Forouzanfar M., Dajani H.R., Groza V.Z. et al. Oscillometric Blood Pressure Estimation: Past, Present, and Future. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*. 2015;8:44–63.
9. Liu Yi, Dang C., Garcia M. et al. Surrounding tissues affect the passive mechanics of the vessel wall: theory and experiment. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*. 2007;(293):H3290–H3300. doi: 10.1152/ajpheart.00666.2007
10. Lan H., Al-Jumaily A.M., Lowe A., Hing W. Effect of tissue mechanical properties on cuff-based blood pressure measurements. *Medical Engineering & Physics*. 2011;33:1287–1292.
11. Gorshkov A.G., Starovoyskiy E.I., Yarovaya A.V. *Mekhanika sloistykh vyazkouprugoplastichnykh elementov konstruksii = Mechanics of layered viscoelastic structural elements*. Moscow: Fizmatlit, 2005:576. (In Russ.)
12. Buzukhov N.I. *Osnovy teorii uprugosti, plastichnosti i polzuchesti = Fundamentals of the theory of elasticity, plasticity and creep*. Moscow: Vyssh. shk., 1961:532. (In Russ.)
13. Terebushko O.I. *Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti = Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity*. Moscow: Nauka, 1984:320. (In Russ.)
14. Samul' V.I. *Osnovy teorii uprugosti i plastichnosti = Fundamentals of the theory of elasticity and plasticity*. Moscow: Vyssh. shk., 1982:264. (In Russ.)
15. Vardayan G.S., Andreev V.I., Atarov N.M., Gorshkov A.A. *Soprotivlenie materialov s osnovami teorii uprugosti i plastichnosti = Resistance of materials with the basics of the theory of elasticity and plasticity*. Moscow: Izd-vo ASB, 1995:568. (In Russ.)
16. Volkova N.A. Algorithm for diagnosing the state of the cardiovascular system based on the results of multiple measurements of blood pressure and pulse. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Povolzhskiy region. Tekhnicheskies nauki = News of higher educational institutions. Volga region. Technical sciences*. 2015;(1):43–49. (In Russ.)
17. Gerashchenko S.I., Gerashchenko S.M., Kostenkov S.Yu. et al. Preparation of images of the process of bone regenerate formation when setting up scanning electron microscopes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2016;(4):82–91. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2016-4-12
18. Lyuminarskiy I.E., Lyuminarskaya E.S. Dynamic model of microswitches with elastic rod elements. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2016;(4):35–42. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2016-4-5

Информация об авторах / Information about the authors

Виталий Германович Полосин

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры
медицинской кибернетики и информатики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: mro@list.ru

Сергей Иванович Геращенко

доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой медицинской
кибернетики и информатики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: mro@list.ru

Михаил Сергеевич Геращенко

старший преподаватель кафедры медицинской
кибернетики и информатики,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: mro@list.ru

Vitaliy G. Polosin

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department
of medical cybernetics and computer science,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Sergey I. Gerashchenko

Doctor of technical sciences, professor,
head of the sub-department
of medical cybernetics and computer science,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Mikhail S. Gerashchenko

Senior lecturer of the sub-department
of medical cybernetics and computer science,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Оксана Евгеньевна Безбородова

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

Oksana E. Bezborodova

Candidate of technical sciences, associate professor,
head of the sub-department of technosphere safety,
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 21.07.2023

Поступила после рецензирования/Revised 22.08.2023

Принята к публикации/Accepted 21.09.2023

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ НА ИЗЛУЧЕНИЕ МИКРОВОЛНОВЫХ АНТЕНН

А. Н. Якимов

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

Аннотация. *Актуальность и цели.* Неизбежные погрешности, возникающие при производстве микроволновой антенны, приводят к отклонению распределения поля (тока) на ее излучающей поверхности от расчетного и соответствующему искажению диаграммы направленности. Правильная оценка влияния случайных ошибок на направленные свойства антенны позволяет установить допуски, обеспечивающие необходимую точность изготовления такой антенны. *Материалы и методы.* Предложен подход к решению этой задачи методом математического моделирования для двух типов остро направленных микроволновых антенн: зеркальной параболической и микрополосковой с непрерывным и дискретным распределением электромагнитных источников в пределах излучающей поверхности соответственно. Построены математические модели рассматриваемых антенн, позволяющие оценить влияние случайных производственных погрешностей на их характеристики излучения. Показана возможность программной реализации предложенных моделей в системе MATLAB, в которых формируется двумерный массив с размерностью матриц координат, соответствующих излучателям, элементы которого являются случайными числами, распределенными по нормальному закону. *Результаты и выводы.* Приведены результаты модельного исследования влияния случайных производственных погрешностей на направленные свойства рассматриваемых зеркальной и микрополосковой антенн. Полученные результаты характерны для традиционного влияния производственных погрешностей на характеристики излучения антенн, что подтверждает адекватность предложенной модели. Таким образом, появляется возможность установления допусков на изготовление рассматриваемых антенн, обеспечивающих приемлемые искажения их излучающих поверхностей еще на этапе проектирования.

Ключевые слова: микроволновая антенна, производственные погрешности, математическая модель, диаграмма направленности

Для цитирования: Якимов А. Н. Моделирование влияния производственных погрешностей на излучение микроволновых антенн // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 74–82. doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-9

MODELING OF THE INFLUENCE OF PRODUCTION ERRORS ON THE RADIATION OF MICROWAVE ANTENNAS

A.N. Yakimov

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

Abstract. *Background.* Unavoidable errors that occur during the production of a microwave antenna lead to a deviation of the field (current) distribution on its radiating surface from the calculated one and a corresponding distortion of the radiation pattern. A correct assessment of the influence of random errors on the directional properties of the antenna allows you to set the tolerances that ensure the necessary accuracy of manufacturing such an antenna. *Materials and methods.* An approach to solving this problem by mathematical modeling is proposed for two types of acutely directional microwave antennas: mirror parabolic and microstrip with continuous and discrete distribution of electromagnetic sources within the radiating surface, respectively. Mathematical models of the antennas under consideration have been constructed to assess the effect of random manufacturing errors on their radiation characteristics. The possibility of software implementation of the proposed models in the MATLAB system is shown, in which a two-dimensional array with the dimension of coordinate matrices corresponding to emitters is formed, the elements of which are random numbers distributed according to the normal law. *Results and conclusions.* The results of a model study of the influence of random manufacturing errors on the directional properties of the considered mirror and microstrip antennas are presented. The results obtained are characteristic of the traditional influence of manufacturing errors on the characteristics

of antenna radiation, which confirms the adequacy of the proposed model. Thus, it becomes possible to establish tolerances for the manufacture of the antennas in question, providing acceptable distortions of their radiating surfaces at the design stage.

Keywords: microwave antenna, production errors, mathematical model, radiation pattern

For citation: Yakimov A.N. Modeling of the influence of production errors on the radiation of microwave antennas. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(3):74–82. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-9

Введение

По мере уменьшения длины электромагнитных волн, используемых в устройствах и антеннах сверхвысоких частот (СВЧ), производственные погрешности оказывают все большее влияние на их электрические характеристики. В связи с этим одной из главных проблем серийного производства современных устройств и антенн СВЧ, к которым относятся и микроволновые антенны, на сегодняшний день стала проблема обеспечения заданной точности их изготовления. Разработчик уже не может ограничиваться электрическими расчетами и практическим конструированием, а должен выполнять еще точностное исследование и обязательно назначать условия и требования на изготовления СВЧ конструкций [1].

Неизбежные погрешности, возникающие при производстве микроволновой антенны, приводят к отклонению распределения поля (тока) на ее излучающей поверхности от расчетного и соответствующему искажению диаграммы направленности (ДН). Систематические ошибки при одинаковом методе изготовления оказываются одинаковыми в различных экземплярах антенны, их можно учесть заранее. Случайные же ошибки при этом могут быть различными и их невозможно учесть заранее, а можно лишь оценить их влияние. Правильная оценка влияния случайных ошибок на направленные свойства антенны позволяет установить допуски, обеспечивающие необходимую точность изготовления антенны [2].

Таким образом, актуальной является задача оценки влияния случайных погрешностей изготовления микроволновых антенн на их характеристики направленности. Рассмотрим возможности решения этой задачи методом математического моделирования для двух типов остро направленных микроволновых антенн: зеркальной параболической антенны и микрополосковой антенны (МПА) с непрерывным и дискретным распределением электромагнитных источников в пределах излучающей поверхности соответственно [3, 4].

Постановка задачи

Влияние производственных погрешностей на характеристики излучения микроволновой антенны можно оценить, если в расчетах ориентироваться на геометрические и электрические характеристики электромагнитных источников излучающей поверхности этой антенны, обеспечиваемые технологическими возможностями производства с учетом производственных отклонений. В зеркальных параболических антеннах такими электромагнитными источниками можно считать конечные элементы излучающей поверхности параболического зеркала (отражателя), а в МПА это прямоугольные излучатели антенного полотна [4, 5].

Случайные отклонения геометрических параметров излучающей поверхности антенны от ее расчетных значений возникают из-за несовершенства технологий изготовления. При изготовлении отражателя зеркальной антенны из-за недостаточной точности обработки поверхности возникают случайные отклонения от его требуемого расчетного профиля, что приводит к ошибкам в распределении поля по апертуре антенны. При изготовлении МПА возникают случайные отклонения геометрических размеров антенны от требуемых расчетных, что приводит к ошибкам в распределении токов по поверхности антенны. В итоге это приводит к изменению характеристики излучения этих антенн.

Случайные производственные погрешности будем, как и принято, моделировать нормальным (гауссовым) законом с нулевым средним значением и вероятностью 99 %, в соответствии с которым распределение вероятности отклонений профиля отражателя зеркальной антенны и геометрии излучающего полотна МПА от расчетных опишется выражением [1, 6]

$$p(\Delta) = \frac{1}{\Delta \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\Delta^2}{\Delta^2}}, \quad (1)$$

где Δ – случайные отклонения профиля отражателя или геометрии излучающего полотна МПА от расчетных; $p(\Delta)$ – плотность вероятности случайной величины, определяющей профиль отражателя или геометрию излучающего полотна; $\bar{\Delta}$ – среднеквадратическое отклонение (СКО) профиля отражателя или геометрии излучающего полотна; $\bar{\Delta}^2$ – дисперсия нормального закона распределения.

Максимальное отклонение Δ_{\max} профиля отражателя или геометрии излучающего полотна МПА от расчетного (допуск на точность изготовления) при этом с вероятностью 99 % не превышает [3]

$$\Delta_{\max} = 2,6 \cdot \bar{\Delta}. \quad (2)$$

Возможностям обычного серийного производства соответствует $\Delta_{\max} \approx 10^{-3} \cdot D$, где D – диаметр отражателя. Более тонкие технологии изготовления отражателей зеркальных антенн, зачастую сопровождающиеся специальной подгонкой формы поверхности, позволяют получить $\Delta_{\max} \leq 10^{-4} \cdot D$.

Для оценки влияния случайных производственных погрешностей на характеристики излучения рассматриваемых микроволновых антенн воспользуемся методом математического моделирования.

Построение математических моделей

Цифровая модель нормального закона распределения реализована в большинстве математических системах расчета. Например, в системе MATLAB, использованной для проведения расчетов, функция *rndn* позволяет создать двумерный массив с размерностью матриц координат $I \times K$, соответствующих излучателям, элементы которого являются случайными числами, распределенными по нормальному закону с математическим ожиданием равным 0 и СКО равным 1 [7].

Это позволяет задать матрицу случайных отклонений геометрических параметров излучателей антенной решетки с учетом производственного допуска как

$$[\text{Rnd1}] = \text{rndn}(I, K) \cdot \Delta_{\max} / 2,6. \quad (3)$$

Случайные величины элементов сформированной таким образом матрицы [Rnd1] некоррелированы.

Если для каждого из параметров, используемых в расчетах и изменяющихся в результате производственных погрешностей по случайному закону, составить матрицы с размерностью $I \times K$, каждый из элементов которой ik соответствует своему излучателю и учитывает отклонение параметров в соответствии с матрицей, определяемой формулой (3), то это позволит оценить влияние этих погрешностей на характеристики излучения антенны.

В зеркальных антеннах случайные величины элементов сформированной таким образом матрицы [Rnd1] некоррелированы, однако интервал (радиус) корреляции реальных антенн r_k обычно составляет длину волны и более. При этом с увеличением интервала корреляции r_k увеличиваются размеры участков реальной поверхности, отклоняющихся от расчетной поверхности. Для учета r_k в [Rnd1] целесообразно разрабатывать специальные функции, дублирующие случайные величины матрицы [Rnd1] с заданным коэффициентом $k_k = (r_k/L_0) + 1$, где L_0 – интервал разбиения поверхности, а r_k – величина кратная L_0 . При этом исходная для дублирования матрица [Rnd1] формируется с меньшей размерностью, обеспечивающей требуемый формат после дублирования с заданным коэффициентом k_k [2, 8, 9].

Такой подход позволяет, несмотря на случайные отклонения профиля по нормальному закону, повторять форму исходной поверхности на заданных интервалах корреляции r_k . Так, например, для геометрической модели отражателя с интервалом разбиения поверхности $L_0 = \lambda = 0,03$ м равным интервалу корреляции r_k получаем $k_k = 2$. При этом случайные производственные погрешности с нормальным законом распределения вероятности отклонений профиля в главном сечении параболического отражателя uOz декартовой системы координат будут иметь вид, представленный на рис. 1.

Так как интервал корреляции $r_k = \lambda$ соответствует современным технологиям изготовления отражающих зеркал микроволновых антенн, то именно его используем при моделировании случайных производственных погрешностей [2, 8].

По отклонениям Δr_{ik} излучающей поверхности отражателя антенны от расчетной в узлах ik ее геометрической модели вдоль направления к фокусу легко рассчитать отклонения этих узлов вдоль осей декартовой системы координат и, следовательно, учесть возникающие искажения и в электродинамической модели излучения этой антенны (рис. 2) [5, 8].

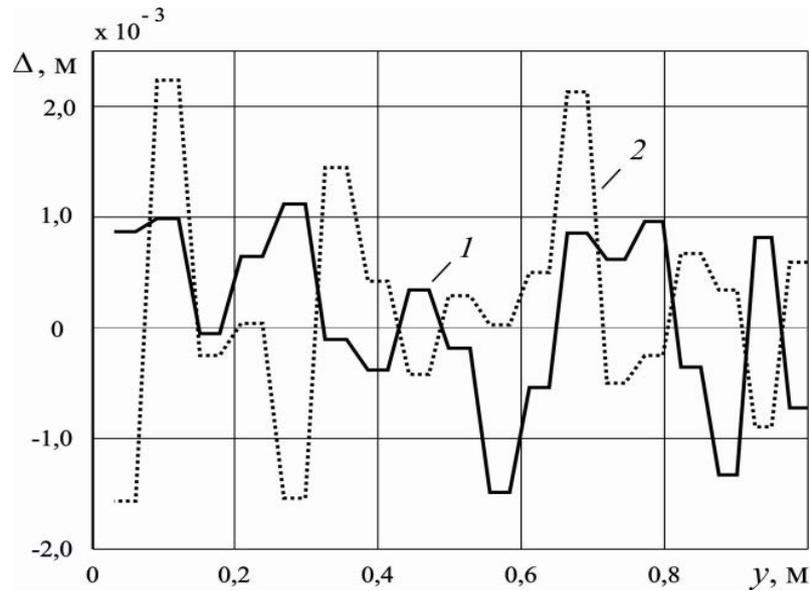


Рис. 1. Фрагмент пространственной картины случайных отклонений профиля зеркальной антенны в его главном сечении yOz по нормальному закону: 1 – при отрицательных координатах; 2 – при положительных координатах

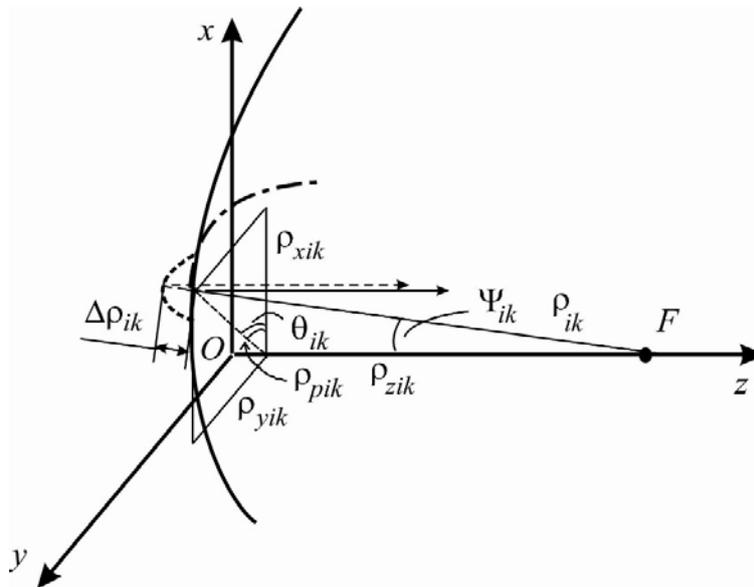


Рис. 2. Составляющие отклонений излучающей поверхности отражателя

Расстояние ρ_{ik} от фокуса параболического отражателя F до узла излучающей поверхности с индексами ik может быть найдено через его составляющие в декартовой системе координат следующим образом:

$$\rho_{ik} = \sqrt{\rho_{xik}^2 + \rho_{yik}^2 + \rho_{zik}^2}. \quad (4)$$

Угол Ψ_{ik} относительно оси антенны в направлении узла ik при этом равен

$$\Psi_{ik} = \arctg(\rho_{pik} / \rho_{zik}), \quad (5)$$

где $\rho_{pik} = \sqrt{\rho_{xik}^2 + \rho_{yik}^2}$.

В свою очередь угол θ_{ik} отклонения узла ik от плоскости xOz может быть определен как

$$\theta_{ik} = \arccos(\rho_{xik} / \rho_{pik}). \quad (6)$$

Тогда, исходя из геометрических построений, отклонения $\Delta\rho_{ik}$ излучающей поверхности отражателя от расчетной вдоль направления к фокусу антенны в узлах ik ее геометрической модели могут быть представлены в виде

$$\Delta\rho_{ik} = \sqrt{\Delta\rho_{xik}^2 + \Delta\rho_{yik}^2 + \Delta\rho_{zik}^2}, \quad (7)$$

а их составляющие в декартовой системе координат с учетом углов Ψ_{ik} и θ_{ik} как

$$\Delta\rho_{zik} = \Delta\rho_{ik} \cos \Psi_{ik}, \quad (8)$$

$$\Delta\rho_{xik} = \Delta\rho_{ik} \sin \Psi_{ik} \cos \theta_{ik}, \quad (9)$$

$$\Delta\rho_{yik} = \Delta\rho_{ik} \sin \Psi_{ik} \sin \theta_{ik}. \quad (10)$$

В результате получаем, что отклонения $\Delta\rho_{ik}$ излучающей поверхности отражателя от расчетной, возникающие вследствие случайных производственных погрешностей, в предложенной математической модели задаются случайным законом и их можно считать описанными.

В соответствии с электродинамической постановкой задачи об излучении зеркальной микроволновой антенны компоненты поля ее излучения получаются суммированием сферических компонент поля E_{φ_i} и E_{θ_i} каждого конечного элемента, а также E_{φ_j} и E_{θ_j} каждого краевого ребра кромки излучающей по антенны относительно глобальной системы координат [5]:

$$E_{\Sigma\varphi} = \sum_i E_{\varphi_i} + \sum_j E_{\varphi_j}, \quad E_{\Sigma\theta} = \sum_i E_{\theta_i} + \sum_j E_{\theta_j}. \quad (11)$$

С учетом этих выражений ДН антенны в горизонтальной плоскости $F(\varphi)$ может быть описана формулой

$$F(\varphi) = E_{\Sigma\varphi}(\varphi) / E_{\max}, \quad (12)$$

где $E_{\max} = E_{\Sigma\varphi}(0)$ – максимальный уровень напряженности электрического поля, равный для симметричных антенн его значению в направлении оси симметрии.

Для оценки влияния случайных производственных погрешностей на характеристики излучения МПА необходимо математическое описание геометрии ее излучающего полотна. Пусть МПА представляет собой антенную решетку, излучающее полотно которой имеет плоскую двумерную конфигурацию, представленную на рис. 3 [4, 10].

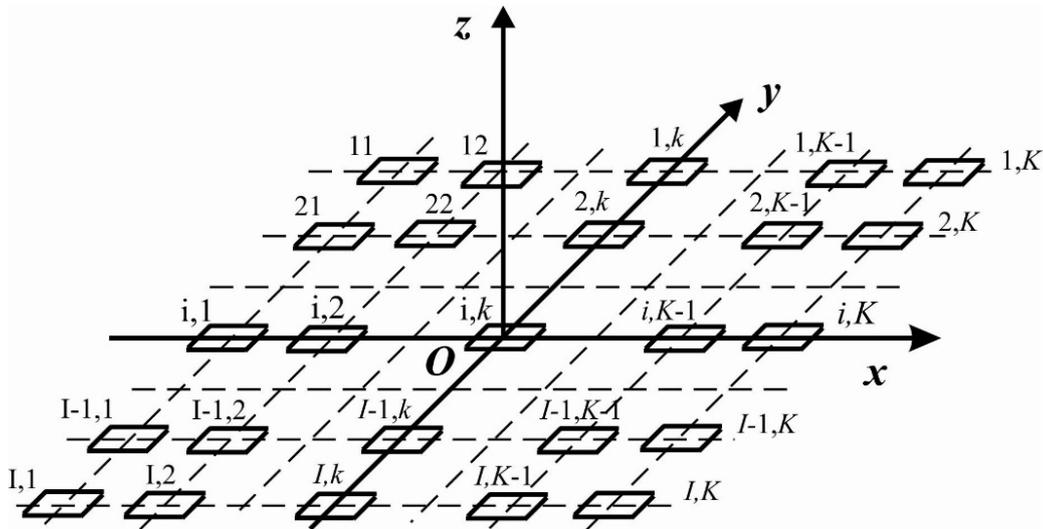


Рис. 3. Излучающее полотно МПА

Здесь I и K – число излучателей антенной решетки расположенных вдоль осей Oy и Ox соответственно. Излучатели такой антенны имеют прямоугольную форму, расположены над слоем диэлектрика с металлическим экраном и возбуждаются от микрополосковых линий.

Использование токового метода для расчета характеристик прямоугольного микрополоскового излучателя позволяет получить выражения, описывающие соответствующие амплитудные ДН в плоскостях векторов электрического \mathbf{E} и магнитного \mathbf{H} полей [4]:

– в плоскости \mathbf{E} ($\varphi = \pi/2$)

$$F_{\theta}(\theta) = \frac{2\xi \cos \theta}{\sqrt{\xi + [\varepsilon \cos \theta \operatorname{ctg}(\xi k_0 d)]^2}} \times \left[\frac{\cos(0,5k_0 b \sin \theta)}{1 - [(k_0 b / \pi) \sin \theta]^2} \right], \quad (13)$$

– в плоскости \mathbf{H} ($\varphi = 0$)

$$F_{\varphi}(\theta) = \frac{2 \cos \theta}{\sqrt{\cos^2 \theta + [\xi \operatorname{ctg}(\xi k_0 d)]^2}} \times \left[\frac{\sin(0,5k_0 a \sin \theta)}{0,5k_0 a \sin \theta} \right], \quad (14)$$

где a и b – ширина и длина излучателей соответственно; d – толщина диэлектрической подложки; $\xi = \sqrt{\varepsilon - \sin^2 \theta}$; ε – относительная диэлектрическая проницаемость материала подложки; θ – угол относительно нормали к плоскости излучателя; φ – угол относительно оси Ox правой декартовой системы координат; $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ – волновое число; λ_0 – длина волны в свободном пространстве.

Координаты точки наблюдения, расположенной в дальней зоне МПА, могут быть найдены относительно ее центральной точки, совпадающей с началом декартовой системы координат как

$$x_c = r_c \cdot \sin \theta \cdot \cos \varphi, \quad y_c = r_c \cdot \sin \theta \cdot \sin \varphi, \quad z_c = r_c \cdot \cos \theta, \quad (15)$$

где r_c – расстояние от центральной точки МПА до точки наблюдения.

Расстояние между центрами излучающих элементов вдоль осей Ox и Oy выбирается равным $\lambda/2$. С учетом координат центров излучающих элементов x_{ik} , y_{ik} и z_{ik} , расстояние от центров излучающих элементов до точки наблюдения r_{ik} определяется выражением

$$r_{ik} = \sqrt{(x_c - x_{ik})^2 + (y_c - y_{ik})^2 + (z_c - z_{ik})^2}. \quad (16)$$

Матрица случайных отклонений геометрических параметров МПА с учетом производственного допуска при этом рассчитывается с использованием выражения (3).

Напряженность \mathbf{E}_{ik} электрического поля, создаваемого излучателями ik в точке наблюдения, может быть определена как

$$\mathbf{E}_{ik} = A \cdot F_{\varphi ik}(\theta) \cdot F_{\theta ik}(\theta) \cdot \exp(-ik_0 r_{ik}) / r_{ik}, \quad (17)$$

где A – амплитудный множитель; $F_{\varphi ik}(\theta), F_{\theta ik}(\theta)$ – диаграммы направленности излучателей в плоскостях \mathbf{H} и \mathbf{E} , учитывающие производственные отклонения.

Напряженность суммарного электрического поля от всех излучателей \mathbf{E}_{Σ} в точке наблюдения при этом равна

$$\mathbf{E}_{\Sigma} = \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \mathbf{E}_{ik}, \quad (18)$$

а нормированная амплитудная ДН МПА определяется выражением

$$F_{\Sigma}(\theta) = |\mathbf{E}_{\Sigma}(\theta)| / |\mathbf{E}_{\Sigma \max}|, \quad (19)$$

где $\mathbf{E}_{\Sigma \max}$ – максимальный уровень напряженности суммарного электрического поля.

Результаты моделирования

Для математического моделирования зеркальной антенны использовалась микроволновая антенна с отражающим зеркалом в виде параболоида вращения с диаметром $D = 2$ м и фокусным расстоянием $f = 0,7$ м при облучении электромагнитной волной с $\lambda = 0,03$ м и вертикальной поляризацией, создаваемой рупором с размерами раскрытия $a_r = 0,65\lambda$ и $b_r = 0,48\lambda$. Исследования, проведенные для такой антенны на конечно-элементной математической модели с использованием формул (3) – (12), показали следующее [8].

При температуре окружающей среды $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и идеально гладкой излучающей поверхности параболоида формируется ДН с шириной на уровне половинной мощности $2\Phi_{0,5} = 1,04$ град (рис. 4, кривая 1), которую будем называть исходной.

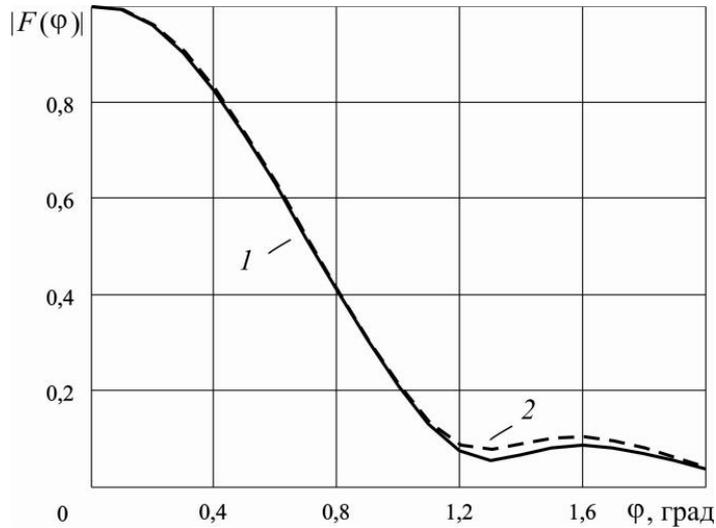


Рис. 4. Диаграммы направленности МПА:
 1 – при идеально гладкой излучающей поверхности;
 2 – с учетом случайных производственных погрешностей при допуске $\Delta_{\max} \approx 10^{-3} \cdot D$

Случайные производственные погрешности при обычном серийном производстве и интервале корреляции $r_k = \lambda$ вызывают рост максимального уровня боковых лепестков (УБЛ) при практически неизменной ширине ДН (рис. 4, кривая 2). Полученный результат хорошо согласуется с данными, приведенными в работах [1, 3].

Для моделирования МПА использовалось излучающее полотно $I = K = 25$ с параметрами: $a = b = 0,48\lambda$; $\epsilon = 2,3$; $d = 1,158$ мм; $\Delta_{\max} = \lambda_0/8$. Длина излучаемой электромагнитной волны составляла $\lambda_0 = 16$ мм, а расстояние $r_c = 100$ м.

Расчеты, проведенные с использованием предложенной модели учета случайных погрешностей и формул (13)–(19), показали следующее [10, 11].

Без учета взаимного влияния излучателей ДН отдельного излучателя, выполненного без учета производственных погрешностей (рис. 5, кривая 1), отличается от ДН аналогичного излучателя, но рассчитанного с учетом производственных погрешностей (см. рис. 3, кривая 2) не очень существенно.

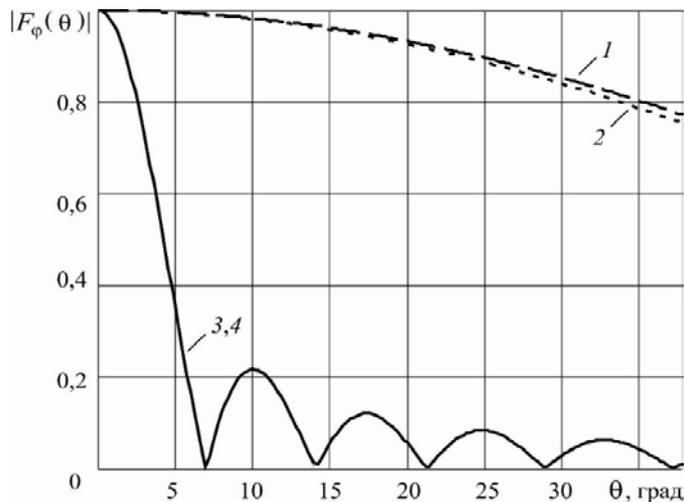


Рис. 5. Диаграммы направленности МПА в плоскости Н:
 1, 2 – для отдельного излучателя без учета и с учетом производственных погрешностей соответственно; 3, 4 – для всей МПА без учета и с учетом производственных погрешностей соответственно

При этом ДН всей МПА без учета (рис. 5, кривая 3) и с учетом (рис. 5, кривая 4) в приведенном масштабе практически совпадают.

Произошедшие изменения все же можно легко заметить, если изменить масштаб представления данных в области перехода от главного к боковым лепесткам ДН (рис. 6).

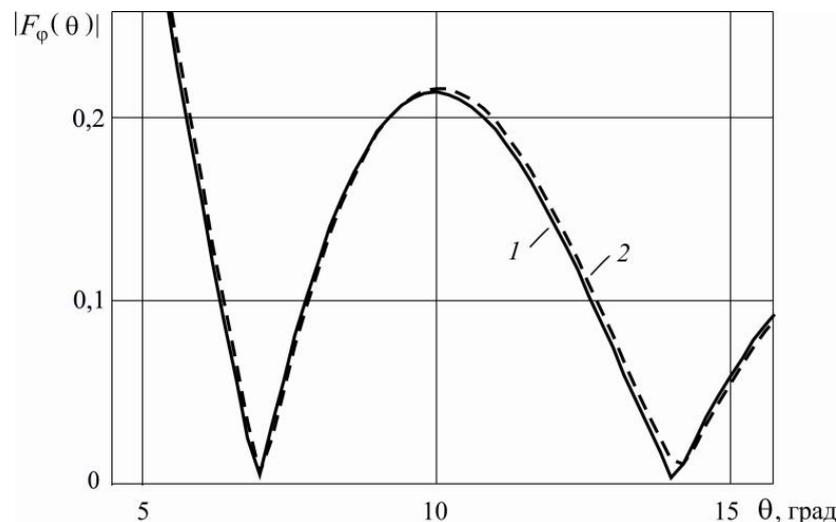


Рис. 6. Диаграммы направленности МПА в области перехода от главного к боковым лепесткам: 1, 2 – без учета и с учетом производственных погрешностей соответственно

При этом видно, что относительно ДН МПА без учета производственных погрешностей (рис. 6, кривая 1) дополнительный учет этих погрешностей приводит к незначительному расширению ДН, расплыванию ее нулевых значений, а также к росту уровня боковых лепестков (рис. 6, кривая 2).

Отмеченные тенденции характерны для традиционного влияния производственных погрешностей на характеристики излучения антенн. С учетом этого предложенный подход к оценке их влияния на излучение зеркальных и МПА может оказаться полезным при проектировании и изготовлении антенн такого типа [1, 4, 8, 10, 12].

Заключение

Предложенное математическое описание случайных производственных погрешностей позволяет учитывать их влияние при моделировании характеристик излучения остронаправленных микроволновых антенн с непрерывным и дискретным распределением электромагнитных источников в пределах излучающей поверхности. Таким образом, появляется возможность установления допусков на изготовление таких антенн, обеспечивающих приемлемые искажения их излучающих поверхностей еще на этапе проектирования.

Список литературы

1. Воробьев Е. А. Расчет производственных допусков устройств СВЧ. Л. : Судостроение, 1980. 148 с.
2. Кочержевский Г. Н., Ерохин Г. А., Козырев Н. Д. Антенно-фидерные устройства. М. : Радио и связь, 1989. 352 с.
3. Сазонов Д. М. Антенны и устройства СВЧ. М. : Высш. шк., 1988. 432 с.
4. Панченко Б. А., Нефедов Е. И. Микрополосковые антенны. М. : Радио и связь, 1986. 144 с.
5. Якимов А. Н. К проблеме дискретного представления излучения параболической антенны // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 3. С. 17–22.
6. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. М. : Радио и связь, 1982. 624 с.
7. Дьяконов В. П., Абраменкова И. В., Круглов В. В. MatLAB 5.3.1 с пакетами расширений / под ред. В. П. Дьяконова. М. : Нолидж, 2001. 880 с.
8. Якимов А. Н. Моделирование случайных производственных погрешностей параболических отражателей // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2004. С. 269–271.
9. Дрabbин А. Л., Зузенко В. Л., Кислов А. Г. Антенно-фидерные устройства. М. : Сов. радио, 1974. 536 с.
10. Якимов А. Н. Оценка влияния производственных погрешностей на характеристики излучения микрополосковой антенны // Труды Международного симпозиума Надежность и качество. 2005. С. 263–265.

11. 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
12. Якимов А. Н. К проблеме дискретного представления излучения параболической антенны // Надежность и качество сложных систем. 2015. № 3. С. 17–22.

References

1. Vorob'ev E.A. *Raschet proizvodstvennykh dopuskov ustroystv SVCh = Calculation of production tolerances of microwave devices*. Leningrad: Sudostroenie, 1980:148. (In Russ.)
2. Kocherzhevskiy G.N., Erokhin G.A., Kozyrev N.D. *Antenno-fidernye ustroystva = Antenna-feeder devices*. Moscow: Radio i svyaz', 1989:352. (In Russ.)
3. Sazonov D.M. *Antenny i ustroystva SVCh = Antennas and microwave devices*. Moscow: Vyssh. shk., 1988:432. (In Russ.)
4. Panchenko B.A., Nefedov E.I. *Mikropoloskovye anteny = Microstrip antennas*. Moscow: Radio i svyaz', 1986:144. (In Russ.)
5. 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.)
6. Tikhonov V.I. *Statisticheskaya radiotekhnika = Statistical radio engineering*. Moscow: Radio i svyaz', 1982:624. (In Russ.)
7. D'yakonov V.P., Abramenkova I.V., Kruglov V.V. *MatLAB 5.3.1 s paketami rasshireniy = MatLAB 5.3.1 with extension packages*. Moscow: Nolidzh, 2001:880. (In Russ.)
8. Yakimov A.N. Modeling of random production errors of parabolic reflectors. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2004:269–271. (In Russ.)
9. Drabkin A.L., Zuzenko V.L., Kislov A.G. *Antenno-fidernye ustroystva = Antenna-feeder devices*. Moscow: Sov. radio, 1974:536. (In Russ.)
10. Yakimov A.N. Evaluation of the influence of production errors on the characteristics of microstrip antenna radiation. *Trudy Mezhdunarodnogo simpoziuma Nadezhnost' i kachestvo = Proceedings of the International Symposium Reliability and Quality*. 2005:263–265. (In Russ.)
11. Yakimov A.N. System approach to the construction of a generalized mathematical model of a microwave antenna. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2022;(3):16–23. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2022-3-2
12. 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.)

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)

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

Поступила в редакцию/Received 15.07.2023

Поступила после рецензирования/Revised 14.08.2023

Принята к публикации/Accepted 11.09.2023

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЬЕЗОЭЛЕМЕНТОВ ИЗ КЕРАМИКИ ТИПА ЦИРКОНАТ-ТИТАНАТ СВИНЦА

В. В. Кикот¹, Е. А. Данилова², А. А. Трофимов³, Т. О. Жуков⁴

¹ Научно-исследовательский институт физических измерений, Пенза, Россия

^{2,3,4} Пензенский государственный университет, Пенза, Россия

¹ piezo@niifi.ru, ² siori@list.ru, ³ alex.t1978@mail.ru, ⁴ DarkR0ket04@mail.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Важнейшим стимулом к исследованию пьезокерамических материалов служат возрастающие требования к расширению диапазона рабочих температур, улучшению метрологических характеристик, устойчивости к воздействию дестабилизирующих факторов устройств, создаваемых на их основе. При этом наряду с поиском новых перспективных материалов и отработкой технологии их изготовления, направленными на решение отмеченных проблем, все более необходимой является разработка высокотемпературных текстурированных материалов для изготовления многослойных пьезоэлементов преобразователей. *Материалы и методы.* Методы исследований выбирали, исходя из возможности получения наиболее полной информации об изменении структуры и свойств материала после спекания и поляризации изделий. При выполнении исследований проводилась термотренировка пьезоэлементов. В ходе работы проводили измерения геометрических размеров и электрофизических параметров элементов пьезокерамических. *Результаты.* Подтверждены основные технические характеристики пьезомодуля, предназначенного для работы в составе лазерных гироскопов. Выявлено, что для получения более плотной керамики требуется разработать метод горячего прессования. Электрическая емкость элементов пьезокерамических соответствует требованиям, предъявляемым со стороны заказчика.

Ключевые слова: пьезомодуль, пьезокерамический элемент, электротренировка, емкость, ток утечки

Для цитирования: Кикот В. В., Данилова Е. А., Трофимов А. А., Жуков Т. О. Исследование влияния повышенной температуры на технические характеристики пьезоэлементов из керамики типа цирконат-титанат свинца // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 83–89. doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-10

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF INCREASED TEMPERATURE ON THE TECHNICAL CHARACTERISTICS OF PIEZO ELEMENTS FROM CERAMICS OF THE ZIRCONATE-TITANATE LEAD TYPE

V.V. Kikot¹, E.A. Danilova², A.A. Trofimov³, T.O. Zhukov⁴

¹ Scientific Research Institute of Physical Measurements, Penza, Russia

^{2,3,4} Penza State University, Penza, Russia

¹ piezo@niifi.ru, ² siori@list.ru, ³ alex.t1978@mail.ru, ⁴ DarkR0ket04@mail.ru

Abstract. *Background.* The most important stimulus for the study of piezoceramic materials is the increasing requirements for expanding the operating temperature range, improving metrological characteristics, and resistance to destabilizing factors of devices created on their basis. At the same time, along with the search for new promising materials and the development of their manufacturing technology aimed at solving the noted problems, it is increasingly necessary to develop high-temperature textured materials for the manufacture of multilayer piezoelectric transducers. *Materials and methods.* Research methods were chosen based on the possibility of obtaining the most complete information about the change in the structure and properties of the material after sintering and the polarization of products. When performing research, thermal training of piezoelectric elements was carried out. In the course of the work, measurements of the geometric dimensions and electrical parameters of piezoceramic elements were carried out. *Results.* The main technical characteristics of the piezoelectric module intended for operation as part of laser gyroscopes have been confirmed. It was found that in order to obtain denser ceramics, it is required to develop a method of hot pressing. The electrical capacitance of the piezoceramic elements meets the requirements of the customer.

Keywords: piezoelectric module, piezoceramic element, electric thermal training, capacitance, leakage current

For citation: Kikot V.V., Danilova E.A., Trofimov A.A., Zhukov T.O. Investigation of the influence of increased temperature on the technical characteristics of piezo elements from ceramics of the zirconate-titanate lead type. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(3):83–89. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-10

Создание пьезокерамических материалов с оптимальными свойствами для различных применений является важной материаловедческой задачей. Параметры пьезоэлементов в значительной степени определяются составом пьезокерамического материала, из которого они изготавливаются.

Анализ литературных данных показывает, что в настоящее время основой для разработки высокотемпературных пьезоматериалов являются титанат свинца, метаниобат свинца, титанат-калия-висмута и висмутосодержащие слоистые сегнетоэлектрики, цирконат-титанат свинца, причем наиболее перспективным направлением получения новых пьезоматериалов с оптимальным набором практически важных параметров стало создание многокомпонентных систем твердых растворов [1, 2].

Однако пьезоэлектрические материалы, применяемые в настоящее время, по некоторым параметрам не удовлетворяют запросы современной измерительной техники, в частности из-за низкой стабильности пьезоэлектрических характеристик в рабочем интервале температур, низкой пьезочувствительности высокотемпературных материалов, высокой электропроводности при повышенных температурах и т.п. Указанные соображения подтверждают актуальность темы исследования в части работ по исследованию влияния повышенной температуры на технические характеристики пьезоэлементов, входящих в состав лазерных гироскопов [3–6].

Для проведения исследований проводилась термотренировка пьезоэлементов производства АО «НИИФИ» по следующему порядку:

- измерение электрических параметров: тока утечки при подаче на электроды элемента электрического напряжения (200 ± 5) В в НКУ и электрической емкости;
- проведение термотренировки:
 - а) подача на элемент электрического напряжения постоянного тока 200 ± 5 В, векторно совпадающего с направлением поляризации элемента;
 - б) подъем температуры до 100 ± 2 °С и выдержка элемента при этой температуре в течение 1 ч;
 - в) измерение тока утечки при подаче на электроды элемента электрического напряжения 200 ± 5 В при температуре 100 ± 2 °С и электрической емкости;
 - г) снятие электрического напряжения с электродов элемента;
 - д) снижение температуры до комнатной;
- измерение электрических параметров: тока утечки при подаче на электроды элемента электрического напряжения 200 ± 5 В в МКУ и электрической емкости.

Элементы считаются выдержавшими испытание, если значение емкости до испытаний и после испытаний изменилось не более чем на 20 %, а емкость, измеренная при температуре 100 ± 2 °С, увеличилась не более чем на 70 %.

Элементы считают выдержавшими испытание, если ток утечки, измеренный при подаче постоянного напряжения 200 В до испытаний, во время испытаний и после испытаний не превысил 0,1 мкА.

Результаты измерения геометрических размеров и электрофизических параметров 15 элементов пьезокерамических (далее – элементов) приведены в табл. 1, где Δd – изменение диаметра элемента при приложении постоянного электрического напряжения 1041 ± 2 В к его электродам; h – толщина элемента; $I_{ут}$ – ток утечки, измеренный при приложении напряжения 200 В к электродам элемента; $ТТ$ – электротренировка; C – емкость.

Таблица 1

Результаты измерения геометрических размеров и электрофизических параметров элементов пьезокерамических

Номер элемента	Δd , мкм на 100 В		C, нФ			Вес, г	h, мм	$I_{ут}$, мкА		
	До ТТ	После ТТ	До ТТ	При 100 °С	После ТТ			До ТТ	При 100 °С	После ТТ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1,40	1,25	15,80	21,28	15,52	1,152	0,374	0,01	0,03	0,02
2	1,40	1,35	15,68	21,38	15,44	1,155	0,382	0,02	0,03	0,01
3	1,40	1,30	15,80	21,41	15,68	1,144	0,374	0,01	0,03	0,01
4	1,40	1,35	15,69	21,20	15,45	1,142	0,376	0,01	0,03	0,01
5	1,40	1,40	15,41	21,03	15,43	1,146	0,379	0,01	0,03	0,01
6	1,40	1,35	16,30	21,87	16,16	1,143	0,379	0,02	0,05	0,01

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7	1,40	1,25	16,04	21,70	16,01	1,146	0,376	0,02	0,04	0,02
8	1,30	1,20	15,74	21,26	15,64	1,169	0,388	0,02	0,04	0,01
9	1,30	1,15	15,98	21,58	15,88	1,160	0,381	0,01	0,02	0,01
10	1,40	1,35	16,10	21,90	16,04	1,136	0,376	0,01	0,02	0,01
11	1,40	1,35	15,80	21,28	15,52	1,140	0,378	0,01	0,02	0,02
12	1,30	1,25	16,17	21,40	16,05	1,150	0,373	0,01	0,02	0,01
13	1,40	1,25	15,82	21,53	15,67	1,149	0,379	0,01	0,03	0,01
14	1,40	1,35	15,74	21,31	15,61	1,145	0,375	0,02	0,03	0,01
15	1,40	1,35	16,00	21,67	15,87	1,146	0,378	0,01	0,02	0,01
16	1,35	1,35	15,79	21,42	15,68	1,153	0,379	0,01	0,02	0,01

По результатам измерений на примере элемента был подсчитан пьезомодуль пьезокерамики d_{31} согласно формуле

$$-d_{31} = \frac{\Delta d h}{U_{\text{вх}} D},$$

где Δd – изменение диаметра элемента при приложении напряжения 100 В, м; D – наружный диаметр элемента, м; d – диаметр центрального отверстия элемента, м; h – толщина элемента, м; $U_{\text{вх}}$ – электрическое напряжение, равное 100 В.

Для элемента № 16:

$$-d_{31} = \frac{1,35 \cdot 10^{-6} \cdot 0,379 \cdot 10^{-3}}{100 \cdot 23 \cdot 10^{-3}} = 222 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}}{\text{Н}}.$$

Также были проверены такие параметры, как плоскостность элементов и адгезия покрытия.

Для экспериментальной пайки блока пьезоэлектрического использовались элементы № 9 и № 12. Электрофизические параметры спаянного блока пьезоэлектрического:

– $\Delta\sigma$ – деформация при приложении постоянного напряжения 0 В к контакту «+», –200 В к контакту «–» и изменении напряжения на контакте «1» от 0 до –200 В – $\Delta\sigma = 10,9$ мкм (по КД на блок пьезоэлектрический – не менее 10,0 мкм);

– $I_{\text{ут}}$ – ток утечки при приложении постоянного напряжения 250 В к контактам «1» и «+» – $I_{\text{ут}} = 0,01$ мкА; к контактам «1» и «–» – $I_{\text{ут}} = 0,03$ мкА (по КД на блок пьезоэлектрический – не более 0,15 мкА);

– C_+ – емкость верхнего элемента – $C_+ = 13,83$ нФ (по КД на блок пьезоэлектрический – 20,0... 60,0 нФ);

– C_- – емкость нижнего элемента – $C_- = 13,63$ нФ (по КД на блок пьезоэлектрический – 20,0... 60,0 нФ).

Проверка качества паяного соединения проводилась методом разрушающего контроля.

С использованием элемента и экспериментального блока пьезоэлектрического были изготовлены шлифы. Фотографии шлифов при разном увеличении представлены на рис. 1–3.

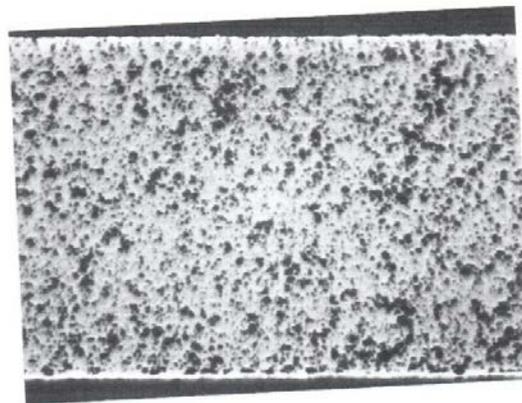


Рис. 1. Фотография микроструктуры элемента пьезокерамического. Увеличение 100×

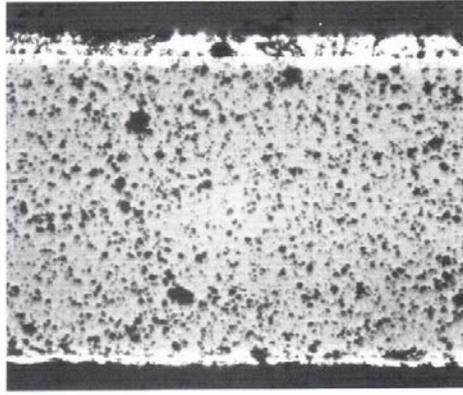


Рис. 2. Фотография микроструктуры элемента пьезокерамического в составе блока пьезоэлектрического. Увеличение 100×

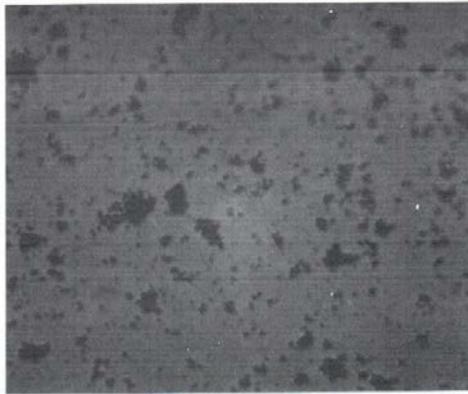


Рис. 3. Фотография микроструктуры элемента пьезокерамического. Увеличение 400×

Представленные фотографии свидетельствуют о том, что структура элементов пьезокерамических пористая. Поры составляют 25–30 % фазового состава материала. Толщина электродов 10...12 мкм [7].

Графики относительного удлинения неполяризованной и поляризованной пьезокерамики в зависимости от температуры представлены на рис. 4 и 5.

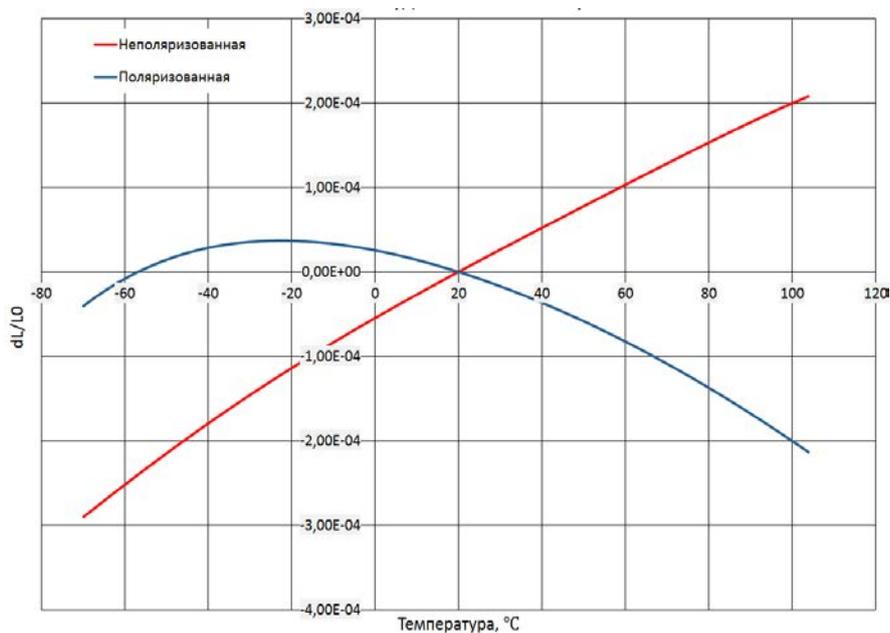


Рис. 4. Графики относительного удлинения пьезокерамики в зависимости от температуры

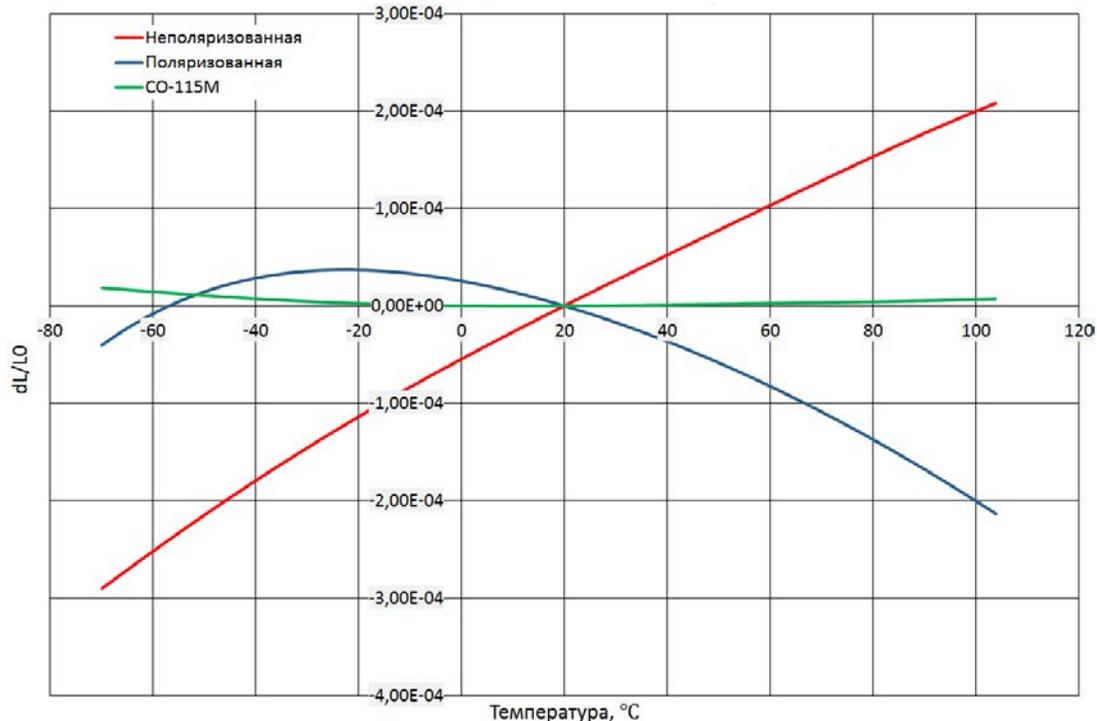


Рис. 5. Графики относительного удлинения пьезокерамики в зависимости от температуры

Из графиков относительного удлинения пьезокерамики в зависимости от температуры можно сделать предположение, что при повышении температуры на наклеенном на ситалловую подложку пьезоэлементе не возникнет микроструктурных дефектов, приводящих к ухудшению электрофизических характеристик.

Заключение

1. Пьезомодуль элементов пьезокерамических $d_{31} = 222 \cdot 10^{-12}$ Кл/Н соответствует требованиям, предъявляемым к элементам пьезокерамическим для их успешной работы в составе лазерных гироскопов.

2. Материал пьезокерамики обладает повышенной пористостью, что увеличивает вероятность появления трещин в процессе пайки и при термических воздействиях, а также повышает опасность пробоя пьезоэлементов во время пайки и в процессе эксплуатации лазерных гироскопов. Повышенная пористость обусловлена способом изготовления элементов – холодного полусухого прессования. Для получения более плотной керамики требуется разработать метод горячего прессования, что влечет за собой приобретение нового оборудования на предприятии-изготовителе [8].

3. При проведении термотренировки элементы ведут себя стабильно: при температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ток утечки не возрастает, емкость возрастает не более, чем на 30 %. Выход годных при проведении термотренировки составляет 100 %.

4. Электрическая емкость элементов пьезокерамических соответствует требованиям, предъявляемым к элементам пьезокерамическим для их работы в составе лазерных гироскопов.

Список литературы

1. Трофимов А. А., Кикот В. В., Фокина Е. А. [и др.]. Исследование технологии создания высокотемпературных текстурированных материалов для изготовления многослойных пьезоэлементов преобразователей // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 2. С. 90–95.
2. Губич И. А., Кикот В. В., Трофимов А. А. [и др.]. Исследование многослойных пьезоактюаторов инжекторов системы управления питанием двигателей внутреннего сгорания // Проблемы автоматизации и управления в технических системах : XXXIV сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. Пенза : Изд-во ПГУ, 2021. С. 98–103.
3. Голяев Ю. Д., Запотьелько Н. Р., Недзвецкая А. А. [и др.]. Лазерные гироскопы с увеличенным временем непрерывной работы // Датчики и системы. 2011. № 11. С. 49–51.

4. Голяев Ю. Д., Запотьлько Н. Р., Недзвецкая А. А., Синельников А. О. Термостабильные оптические резонаторы для зеемановских лазерных гироскопов // Оптика и спектроскопия. 2012. Т. 113, № 2. С. 253.
5. Запотьлько Н. Р., Катков А. А., Синельников А. О. Пассивная термокомпенсация оптического периметра лазерных гироскопов, изготовленных с использованием различных конструкционных материалов // Датчики и системы. 2014. № 1. С. 8–13.
6. Запотьлько Н. Р., Катков А. А., Недзвецкая А. А. Пьезокорректор для компенсации тепловых вариаций длины оптического пути резонатора лазерного гироскопа // Оптический журнал. 2011. Т. 78, № 10. С. 10–12.
7. Перевертов В. П., Андрончев И. К., Юрков Н. К. Порошковые композиты и наноматериалы в гибких технологиях формообразования деталей // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 2. С. 85–95. doi: 10.21685/2307-4205-2020-2-9
8. Разоренов А. Г., Медведев А. М. Электрохимическая модель отказов электроизоляционных конструкций из композиционных материалов // Надежность и качество сложных систем. 2016. № 3. С. 11–14. doi: 10.21685/2307-4205-2016-3-2

References

1. Trofimov A.A., Kikot V.V., Fokina E.A. et al. Investigation of the technology of creating high-temperature textured materials for the manufacture of multilayer piezoelectric elements of converters. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(2):90–95. (In Russ.)
2. Gubich I.A., Kikot V.V., Trofimov A.A. et al. Investigation of multilayer piezoactuators of injectors of the internal combustion engine power management system. *Problemy avtomatizatsii i upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh: XXXIV sb. st. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Problems of automation and control in technical systems : XXXIV collection of articles of the International scientific and practical conference*. Penza: Izd-vo PGU, 2021:98–103. (In Russ.)
3. Golyaev Yu.D., Zapoty'ko N.R., Nedzvetskaya A.A. et al. Laser gyroscopes with extended continuous operation time. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2011;(11):49–51. (In Russ.)
4. Golyaev Yu.D., Zapoty'ko N.R., Nedzvetskaya A.A., Sinel'nikov A.O. Thermostable optical resonators for Zeeman laser gyroscopes. *Optika i spektroskopiya = Optics and spectroscopy*. 2012;113(2):253. (In Russ.)
5. Zapoty'ko N.R., Katkov A.A., Sinel'nikov A.O. Passive thermal compensation of the optical perimeter of laser gyroscopes manufactured using various structural materials. *Datchiki i sistemy = Sensors and systems*. 2014;(1):8–13. (In Russ.)
6. Zapoty'ko N.R., Katkov A.A., Nedzvetskaya A.A. Piezocorrector for compensation of thermal variations in the length of the optical path of the laser gyroscope resonator. *Opticheskiy zhurnal = Optical Journal*. 2011;78(10): 10–12. (In Russ.)
7. Perevertov V.P., Andronchev I.K., Yurkov N.K. Powder composites and nanomaterials in flexible technologies of forming parts. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2020;(2):85–95. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2020-2-9
8. Razorenov A.G., Medvedev A.M. Electrochemical model of failures of electrical insulating structures made of composite materials. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2016;(3):11–14. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2016-3-2

Информация об авторах / Information about the authors

Виктор Викторович Кикот

кандидат технических наук,
начальник центра пьезопроизводства,
Научно-исследовательский институт
физических измерений
(Россия, г. Пенза, ул. Володарского, 10)
E-mail: piezo@niifi.ru

Viktor V. Kikot

Candidate of technical sciences,
head of piezo production center,
Research and Development Institute
for Physical Measurements
(10 Volodarsky street, Penza, Russia)

Евгения Анатольевна Данилова

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

Evgeniya A. Danilova

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

Алексей Анатольевич Трофимов

доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры информационно-измерительной
техники и метрологии,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: alex.t1978@mail.ru

Тимофей Олегович Жуков

студент,
Пензенский государственный университет
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)
E-mail: DarkR0ket04@mail.ru

Aleksei A. Trofimov

Doctor of technical sciences, associate professor,
professor of the sub-department of information
and measuring equipment and metrology,
Penza State University
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

Timofei O. Zhukov

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 17.06.2023

Поступила после рецензирования/Revised 17.07.2023

Принята к публикации/Accepted 15.08.2023

АНАЛИЗ ТЕПЛОВОГО ВЛИЯНИЯ ДВУХ ВНУТРЕННИХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПРОВОДНИКОВ ПЛАТЫ, УСТАНОВЛЕННЫХ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЕ ОСНОВАНИЕ И РАСПОЛОЖЕННЫХ В ОДНОМ СЛОЕ

А. В. Костин¹, Д. С. Богданов², И. С. Бобров³

^{1,2,3} Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева, Самара, Россия
¹ electrodynamics27@yandex.ru, ² kipres@ssau.ru, ³ bobrov@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Приводится анализ теплового влияния двух внутренних параллельных печатных проводников платы, расположенных в одном слое, которые установлены на металлическое основание (друг на друга) и работают в условиях космического вакуума. Целью работы являлось проведение анализа взаимного влияния двух внутренних параллельных печатных проводников, расположенных на одном слое, плат, установленных на металлическое основание и работающих в условиях космического вакуума, друг на друга, для выявления зависимости их температуры от расстояния между ними и определения расстояния, при котором эта зависимость практически исчезает. *Материалы и метод.* Рассмотрены результаты расчетов температуры печатных проводников при различных расстояниях между ними для разных печатных плат. Все расчеты выполнены численным методом, реализованным в программе ANSYS 2021 R1, модуль Steady-State Thermal. Даются результаты аппроксимации полученных данных. Приводятся расстояния между печатными проводниками, при которых их взаимное влияние практически полностью исчезает. *Вывод.* Проводящий рисунок платы весьма сложен. Между собой могут взаимодействовать и печатные проводники, расположенные на разных слоях и идущие под углом относительно друг друга. Произведено моделирование теплового процесса, произведен теоретический расчет и построены графики, которые помогут при практическом проектировании печатной платы.

Ключевые слова: печатный проводник, печатная плата, аппроксимация, тепловой процесс, металлическое основание

Для цитирования: Костин А. В., Богданов Д. С., Бобров И. С. Анализ теплового влияния двух внутренних параллельных печатных проводников платы, установленных на металлическое основание и расположенных в одном слое // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 90–99. doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-11

ANALYSIS OF THE THERMAL EFFECT OF TWO INTERNAL PARALLEL PRINTED CIRCUIT BOARD CONDUCTORS MOUNTED ON A METAL BASE AND LOCATED IN ONE LAYER

A.V. Kostin¹, D.S. Bogdanov², I.S. Bobrov³

^{1,2,3} Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev, Samara, Russia
¹ electrodynamics27@yandex.ru, ² kipres@ssau.ru, ³ bobrov@yandex.ru

Abstract. *Background.* An analysis is made of the thermal effect of two internal parallel printed circuit board conductors located in one layer, which are installed on a metal base (on top of each other) and operate in space vacuum conditions. The purpose of the work was to analyze the mutual influence of two internal parallel PCBs located on the same layer, boards installed on a metal base and operating in space vacuum conditions, on each other, in order to identify the dependence of their temperature on the distance between them and determine the distance at which this dependency almost disappears. *Materials and method.* The results of calculating the temperature of printed conductors at different distances between them for different printed circuit boards are considered. All calculations were performed numerically, implemented in the ANSYS 2021 R1 program, Steady-State Thermal module. The results of approximation of the obtained data are given. The distances between the printed conductors are given, at which their mutual influence almost completely disappears. *Conclusions.* The conductive pattern of the board is quite complex. PPs located on different layers and running at an angle relative to each other can also interact with each other. The simulation of the thermal process has been carried out, the theoretical calculation and the construction of graphs have been made, which will help in the practical design of the printed circuit board.

Keywords: printed conductor, printed circuit board, approximation, thermal process, metal base

For citation: Kostin A.V., Bogdanov D.S., Bobrov I.S. Analysis of the thermal effect of two internal parallel printed circuit board conductors mounted on a metal base and located in one layer. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems.* 2023;(3):90–99. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-11

Введение

В космическом приборостроении получили широкое распространение печатные платы на металлическом основании. Такие платы чаще всего работают в условиях отсутствия конвекции. Одной из задач, решаемых в процессе проектирования печатных плат, является выбор ширины печатных проводников (ПП), которая в основном определяется током, протекающим через него. Отечественная и зарубежная нормативно-технические документации дают указания по выбору ширины ПП, но не для плат на металлическом основании¹. В некоторых публикациях приводятся формулы для расчета ПП печатных плат на металлическом основании, но работающих в условиях естественной конвекции [1]. Автором настоящей работы в статье [2] приводится подобная методика, однако она не рассматривает влияние ПП друг на друга. В реальных печатных платах проводящий рисунок достаточно сложный. Соседние ПП могут подогревать друг друга. Самое большое влияние будут оказывать друг на друга ПП, идущие параллельно. Они могут находиться как на одном слое, так и на разных. Могут быть внутренними и внешними.

Проводятся работы по анализу взаимного теплового влияния ПП друг на друга для плат, установленных на металлическом основании, работающих в условиях космического вакуума. Второй из озвученных работ является изучение взаимного влияния двух внутренних параллельных ПП, расположенных на одном слое, описанию результатов которой посвящена настоящая статья.

Методика и результаты расчетов

Проводится анализ взаимного влияния двух внутренних параллельных ПП, расположенных на одном слое плат, установленных на металлическое основание и работающих в условиях космического вакуума, друг на друга, для выявления зависимости их температуры от расстояния между ними и определения расстояния, при котором эта зависимость практически исчезает.

Для достижения цели были решены следующие задачи:

- проведен расчет температур ПП для разных расстояний между ними на разных слоях восьмислойной печатной платы;
- проведена аппроксимация результатов расчета;
- определено расстояние между ПП, при котором взаимное влияние практически исчезает.

В работе [2] было показано, что даже для одиночного ПП система уравнений теплопроводности будет достаточно сложной. Для двух ПП она будет еще сложнее. Решать такую задачу аналитически нецелесообразно. Для ее решения использовался конечно-элементный метод, реализованный в программе ANSYS 2021 R1, модуль Steady-State Thermal.

Расчету подвергалась 8-слойная печатная плата. Слои со 2 по 7 – внутренние слои. Схемы расположения слоев соответствуют [2]. Ширина изоляционных слоев (W) выбрана такой, чтобы края печатной платы не влияли на температуру ПП. При этом она не должна быть слишком большой, чтобы не увеличивать количество конечных элементов. Исходя из указанных выше соображений, значение было выбрано равным 21 мм. Величина ширины ПП (t) выбрана равной 1 мм. Значение толщины ПП ($h_{\text{П}}$) выбрано равным 35 мкм. Величина удельного электрического сопротивления ПП (ρ) принята равной $1,72 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, что соответствует медной фольге². Коэффициенты теплопроводности материалов приняты равными, такими же, как и в работе [2]. Значение плотности мощности, рассеиваемой ПП под действием тока, было выбрано равным $3,51 \cdot 10^8$ Вт/м³, что соответствует значению силы тока 5 А, при заданных размерах ПП. При такой силе тока температура ПП не слишком высокая (не превышает температуру стеклования материала платы) и не слишком низкая (перегрев ниже 10 °С только на слое 2). При этом длина фрагмента печатной платы составила 0,5 мм. Расстояние между ПП (t_1) варьируется от 1 до 10 мм с шагом 1 мм. Значение температуры основания (T_0) составляет 0 °С. При такой

¹ ГОСТ Р 53429–2009. Платы печатные. Основные параметры конструкции ; РД 50-708-91. Печатные платы. Требования к конструкции ; IPC-2221A. Generic Standard on Printed Board Design ; IPC-2152. Standard for Determining Current-Carrying Capacity in Printed Board Design.

² РД 50-708-91. Печатные платы. Требования к конструкции.

температуре основания температура будет численно равна перегреву (разнице между температурами ПП и основания).

На рис. 1, 2 показаны температурные поля, создаваемые ПП, расположенными на слое 3 и 6 соответственно. В обоих случаях t_1 составляет 1 мм. По обоим ПП течет ток. Это видно из рисунков. Температура в зоне обоих ПП самая высокая. Из рисунков видно, что чем ближе ПП к основанию, тем ниже температура внешней поверхности платы над ними. Температурные поля ПП явно взаимодействуют друг с другом. Результаты расчетов в виде перегрева ПП приведены в табл. 1. Под активными понимаются те ПП, по которым течет ток. Моделирование проводилось в двух режимах. В первом режиме первый ПП (тот, что слева) был выключен (пассивный). Ток по нему не протекал. Во втором режиме первый ПП был включен (активный). Ток по нему протекал. По второму ПП (тот, что справа) ток протекал всегда. Количество активных ПП в первом режиме равно единице, только второй. Количество активных ПП во втором режиме равно двум.

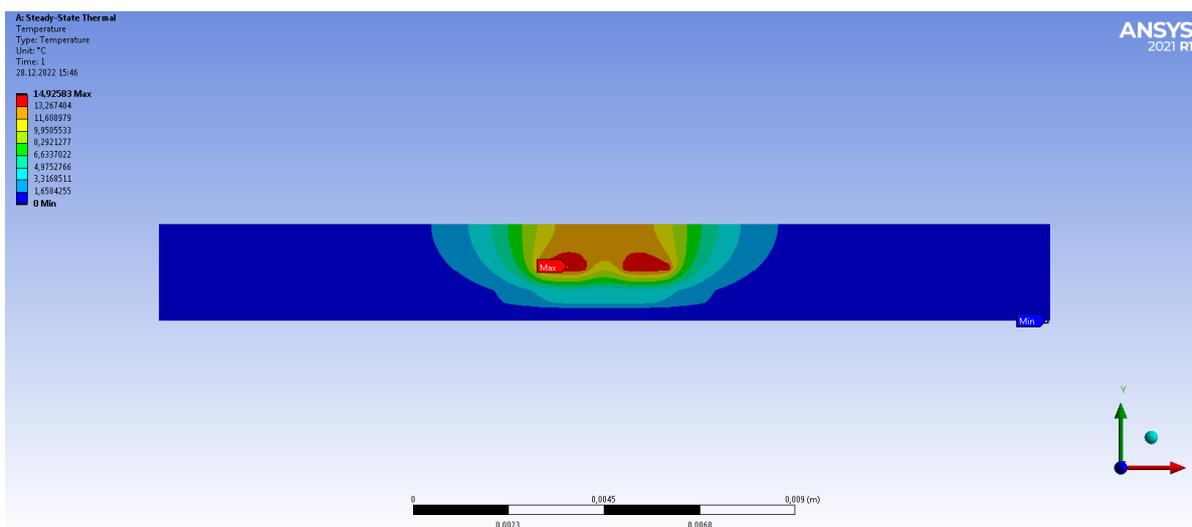


Рис. 1. Температурное поле, создаваемое ПП, расположенными на третьем слое, $t_1 = 1$ мм

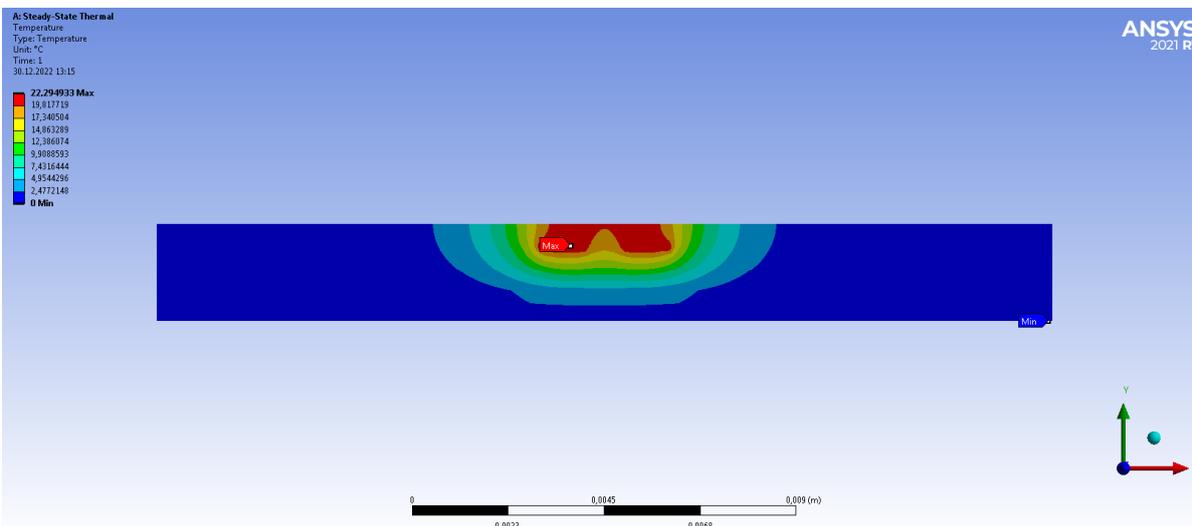


Рис. 2. Температурное поле, создаваемое ПП, расположенными на шестом слое, $t_1 = 1$ мм

Использованный расчетный модуль не позволяет учесть температурный коэффициент сопротивления (ТКС) материала ПП. В табл. 1 приведен перегрев без учета ТКС. Он был учтен путем пересчета. В печатных платах, установленных на металлическое основание и работающих в условиях отсутствия конвекции, отвод тепла происходит за счет теплопроводности на металлическое основание. Излучение отводит тепло незначительно по сравнению с теплопроводностью [3]. При расчете в ANSYS эта особенность тоже была использована, излучение не моделировалось. Для одиночного ПП можно записать выражение для перегрева с учетом ТКС

$$\Delta T_{\Pi} = R_T P(\alpha) = R_T I^2 R_0 (1 + \alpha \Delta T_{\Pi}), \quad (1)$$

где R_T – тепловое сопротивление между поверхностью ПП и основанием; α – ТКС; $P(\alpha)$ – тепловой поток как функция от ТКС; I – сила тока, текущего через ПП; R_0 – электрическое сопротивление, рассчитанное при удельном электрическом сопротивлении, приведенном в справочной литературе или стандартах (обычно при 20 °С).

Как было показано в работе [2], поверхность ПП можно считать изотермической, так как она имеет примерно одинаковую температуру в любых точках. Если R_0 рассчитано при 20 °С (T_p), то и перегрев должен быть рассчитан относительно этой температуры. Другими словами, температура основания должна быть равна 20 °С ($T_0 = T_p$). В противном случае в формуле (1) ТКС нужно умножить не на перегрев, а на сумму $\Delta T_{\Pi} + (T_0 - T_p)$. Для простоты вычислений было принято $T_0 = T_p$. В инструкции РД60-708-91 не указано, для какой температуры приведено значение ρ . Но значение удельного электрического сопротивления соответствует значению, приведенному в работе [4] для катодной переплавленной меди марки М1 ($1,724 \cdot 10^8$ Ом·м) при температуре 20 °С. α принят равным 0,0043 1/К согласно [4].

Таблица 1

Результаты расчетов перегрева без учета ТКС, °С

Слой 2											
Кол-во активных ПП (номер режима)	Номер ПП	t_1 , мм									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	1,146	0,474	0,204	0,090	0,040	0,018	0,008	0,004	0,002	0
	2	8,561	8,542	8,590	8,569	8,584	8,549	8,588	8,586	8,579	8,563
2	1	9,689	8,994	8,780	8,696	8,617	8,573	8,570	8,576	8,581	8,579
	2	9,694	9,011	8,792	8,659	8,624	8,567	8,596	8,589	8,580	8,564
Слой 3											
Кол-во активных ПП (номер режима)	Номер ПП	t_1 , мм									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	2,340	1,023	0,457	0,205	0,092	0,041	0,019	0,008	0,004	0,002
	2	12,606	12,669	12,723	12,684	12,662	12,694	12,705	12,702	12,691	12,651
2	1	14,901	13,713	13,127	12,884	12,761	12,760	12,713	12,688	12,673	12,681
	2	14,926	13,684	13,177	12,887	12,754	12,735	12,724	12,710	12,694	12,652
Слой 4											
Кол-во активных ПП (номер режима)	Номер ПП	t_1 , мм									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	2,705	1,186	0,533	0,240	0,107	0,051	0,018	0,006	0,003	0,001
	2	13,448	13,601	13,653	13,603	13,545	13,603	13,61	13,675	13,669	13,611
2	1	16,134	14,713	14,132	13,831	13,72	13,678	13,663	13,629	13,61	13,654
	2	16,130	14,777	14,181	13,84	13,652	13,651	13,631	13,685	13,674	13,613
Слой 5											
Кол-во активных ПП (номер режима)	Номер ПП	t_1 , мм									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	3,986	1,759	0,791	0,357	0,159	0,072	0,032	0,014	0,006	0,003
	2	16,790	16,878	16,951	16,965	17,001	16,984	16,963	16,964	17,017	17,008
2	1	20,653	18,629	17,710	17,300	17,156	17,026	17,033	17,026	16,996	16,984
	2	20,748	18,624	17,736	17,319	17,158	17,055	16,995	16,978	17,024	16,974

Слой 6											
Кол-во активных ПП (номер режима)	Номер ПП	$t_1, \text{ мм}$									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	4,409	1,938	0,866	0,386	0,173	0,078	0,035	0,016	0,007	0,003
	2	17,916	18,185	18,133	18,220	18,193	18,208	18,215	18,215	18,136	18,210
2	1	22,283	20,072	19,053	18,541	18,335	18,302	18,220	18,214	18,202	18,229
	2	22,295	20,109	18,993	18,604	18,365	18,286	18,249	18,230	18,143	18,213
Слой 7											
Кол-во активных ПП (номер режима)	Номер ПП	$t_1, \text{ мм}$									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	5,361	2,325	1,026	0,458	0,205	0,092	0,041	0,019	0,008	0,004
	2	22,417	22,654	22,726	22,715	22,746	22,748	22,680	22,703	22,732	22,708
2	1	27,726	24,88	23,742	23,178	22,925	22,775	22,712	22,729	22,788	22,770
	2	27,745	24,963	23,746	23,169	22,95	22,839	22,721	22,722	22,740	22,712

Перегрев без учета ТКС можно записать в виде

$$\Delta T_{\Pi}' = R_{\Gamma} I^2 R_0. \tag{2}$$

Подставив (2) в (1) и выразив перегрев с учетом ТКС, получим

$$\Delta T_{\Pi} = \frac{\Delta T_{\Pi}'}{1 - \alpha \Delta T_{\Pi}'}. \tag{3}$$

Формула (3) позволяет рассчитать перегрев с учетом ТКС через перегрев без учета ТКС для одиночного ПП.

Для вывода формулы аналогичной (3) для двух ПП воспользуемся принципом суперпозиции температурных полей [5]

$$T_j = T_C + \sum_{i=1}^n P_i F_{ij}, \tag{4}$$

где T_j – температура в j -й точке; T_C – температура внешней среды; P_i – мощность источников в i -й части системы; n – число характерных областей, из которых состоит система; F_{ij} – тепловые коэффициенты, не зависящие ни от температуры внешней среды, ни от величины мощности источников.

Для рассматриваемого случая выражение (4) можно записать в виде

$$\begin{cases} \Delta T_{\Pi 1} = F_{21} P + F_{11} P, \\ \Delta T_{\Pi 2} = F_{12} P + F_{22} P, \end{cases} \tag{5}$$

где $\Delta T_{\Pi 1}$ – температура левого ПП; $\Delta T_{\Pi 2}$ – температура правого ПП; P – мощность, рассеиваемая в ПП, в обоих одинаковая.

ТКС влияет на мощность, рассеиваемую в ПП. Если температура ПП увеличивается, то его электрическое сопротивление растет. Рост электрического сопротивления приводит к росту рассеиваемой мощности. Поскольку мощность прямо пропорциональна произведению электрического сопротивления на квадрат силы тока, то и мощность будет увеличиваться в $(1 + \alpha \Delta T_{\Pi})$ раз. Тогда выражение (5) можно записать в виде

$$\begin{cases} \Delta T_{\Pi 1} = F_{21} (1 + \alpha \Delta T_{\Pi 2}) P' + F_{11} (1 + \alpha \Delta T_{\Pi 1}) P', \\ \Delta T_{\Pi 2} = F_{12} (1 + \alpha \Delta T_{\Pi 1}) P' + F_{22} (1 + \alpha \Delta T_{\Pi 2}) P', \end{cases} \tag{6}$$

где P' – мощность без учета ТКС.

Решив систему алгебраических уравнений (6) относительно $\Delta T_{\text{П1}}, \Delta T_{\text{П2}}$, получим

$$\Delta T_{\text{П1}} = \frac{F_{21}P' + \alpha\Delta T_{\text{П2}}P'F_{21} + F_{11}P'}{1 - \alpha F_{11}P'}; \tag{7}$$

$$\Delta T_{\text{П2}} = \frac{P'(1 - \alpha F_{11}P')(F_{12} + F_{22}) + \alpha P'^2 F_{12}(F_{21} + F_{11})}{(1 - \alpha F_{22}P')(1 - \alpha F_{11}P') - \alpha^2 P'^2 F_{12}F_{21}}. \tag{8}$$

Тепловые коэффициенты можно найти по данным, приведенным в табл. 1, так как они не зависят ни от температуры, ни от величины мощности источников. Сделать это можно по экспериментальному методу, описанному в работе [4], только вместо экспериментальных данных будем использовать данные расчета. Итак, тепловые коэффициенты найдем по формулам

$$F_{22} = \frac{\Delta T_{\text{П2}}^{(2)}}{P'}; F_{12} = \frac{\Delta T'_{\text{П2}}}{P'} - F_{22}; F_{21} = \frac{\Delta T_{\text{П1}}^{(2)}}{P'}; F_{11} = \frac{\Delta T'_{\text{П1}}}{P'} - F_{21}, \tag{9}$$

где $\Delta T_{\text{П2}}^{(2)}$ – перегрев правого ПП при активном только правом ПП, без учета ТКС (режим 1, ПП № 2 табл. 1); $\Delta T'_{\text{П2}}$ – перегрев правого ПП при обоих активных ПП, без учета ТКС (режим 2, ПП № 2 табл. 1); $\Delta T_{\text{П1}}^{(2)}$ – перегрев левого ПП при активном только правом ПП, без учета ТКС (режим 1, ПП № 1 табл. 1); $\Delta T'_{\text{П1}}$ – перегрев левого ПП при обоих активных ПП, без учета ТКС (режим 2, ПП № 1 табл. 1).

Результаты расчета по формулам (7) и (8) с учетом (9) приведены в табл. 2. На рис. 3–5 приведены точки, соответствующие значениям перегревов, приведенным в табл. 2 для слоев 2, 4, 7, и графики зависимостей перегрева от расстояния между ПП для тех же слоев. Графики приведены не все, чтобы не загромождать настоящую публикацию. Графики получены путем аппроксимации методом наименьших квадратов. Если рассматривать данные, приведенные в табл. 2, то видно, что перегрев правого и левого ПП практически не отличается. Это вполне логично, ведь они одинаковые. Для построения и аппроксимации взяты значения перегревов для первого ПП.

Таблица 2

Результаты расчетов перегрева с учетом ТКС, °С

Слой 2										
Номер ПП	$t_1, \text{ мм}$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	10,110	9,356	9,124	9,034	8,949	8,901	8,898	8,904	8,910	8,908
2	10,116	9,374	9,137	8,994	8,956	8,895	8,926	8,918	8,909	8,891
Слой 3										
Номер ПП	$t_1, \text{ мм}$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	15,921	14,572	13,912	13,64	13,502	13,501	13,448	13,42	13,403	13,412
2	15,949	14,540	13,968	13,643	13,494	13,473	13,460	13,445	13,427	13,380
Слой 4										
Номер ПП	$t_1, \text{ мм}$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	17,337	15,707	15,046	14,706	14,58	14,533	14,516	14,477	14,456	14,506
2	17,332	15,779	15,102	14,716	14,503	14,502	14,480	14,541	14,528	14,459
Слой 5										
Номер ПП	$t_1, \text{ мм}$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	22,668	20,251	19,17	18,69	18,522	18,371	18,379	18,371	18,336	18,322
2	22,778	20,245	19,200	18,713	18,525	18,405	18,335	18,315	18,369	18,310
Слой 6										
Номер ПП	$t_1, \text{ мм}$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	24,645	21,968	20,753	20,147	19,904	19,865	19,769	19,762	19,748	19,779
2	24,659	22,012	20,682	20,222	19,940	19,847	19,803	19,781	19,678	19,761

		Слой 7									
Номер ПП	$t_1, \text{мм}$										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	31,480	27,862	26,441	25,744	25,432	25,248	25,170	25,191	25,264	25,241	
2	31,503	27,964	26,446	25,733	25,463	25,326	25,181	25,182	25,205	25,170	

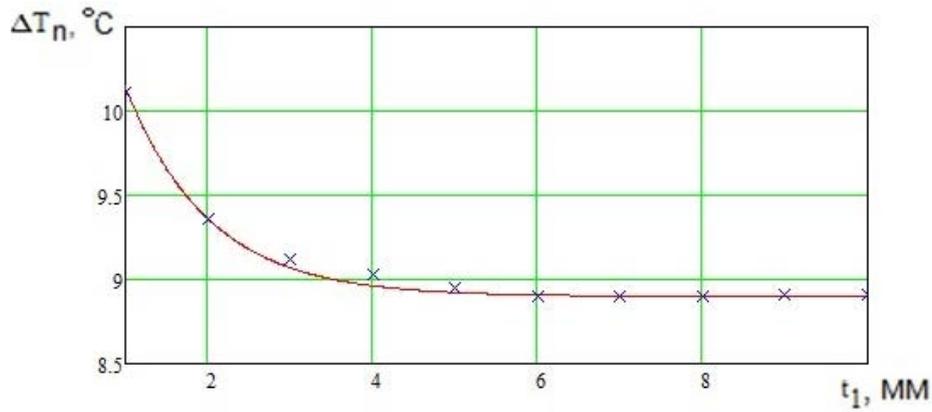


Рис. 3. Зависимость перегрева ПП слоя 2 от t_1

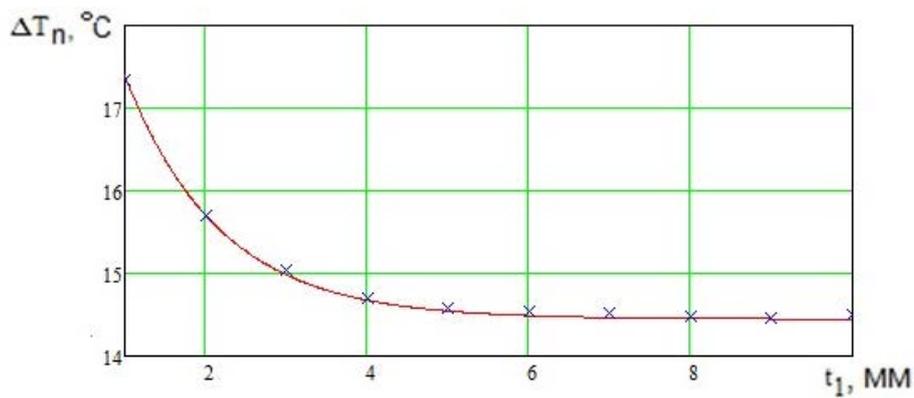


Рис. 4. Зависимость перегрева ПП слоя 4 от t_1

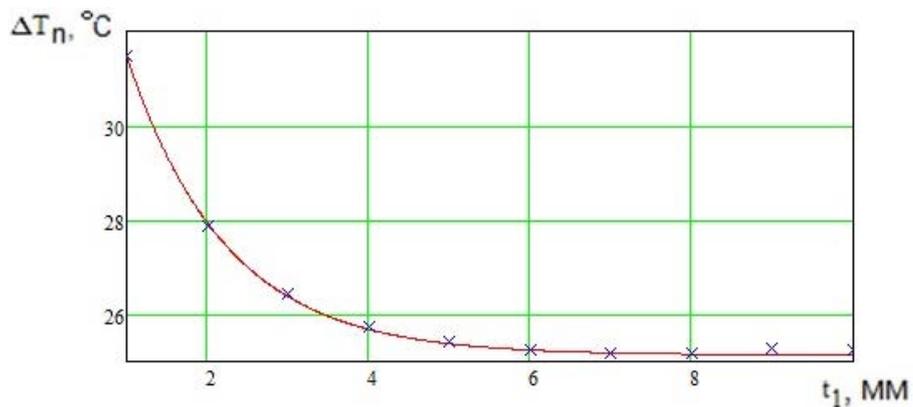


Рис. 5. Зависимость перегрева ПП слоя 7 от t_1

Функция, которой были аппроксимированы результаты, имеет вид

$$\Delta T_{\text{П}} = (\Delta T_{\text{max}} - \Delta T_{\text{min}}) e^{-at_1} + \Delta T_{\text{min}} \quad (10)$$

В формуле (10) используются разности температур и коэффициент a , значения которых приведены в табл. 3. Смысл выражения понятен из рис. 6.

Таблица 3

Значения разностей температур и коэффициента a

Слой	$\Delta T_{\min}, ^\circ\text{C}$	$\Delta T_{\max}, ^\circ\text{C}$	$a, 1/\text{м}$
2	8,899	12,268	993,920
3	13,410	19,592	864,287
4	14,447	21,375	853,650
5	18,285	28,244	812,119
6	19,702	30,704	792,882
7	25,134	39,521	817,456

Как видно их графиков на рис. 3–5, при увеличении расстояния между ПП взаимное влияние их друг на друга уменьшается. При определенных значениях t_1 ПП практически перестают воздействовать друг на друга. Экспонента асимптотически приближается к температуре, соответствующей температуре одиночного ПП.

Определим t_1 , при котором взаимодействие ПП практически прекращается. Критерием прекращения взаимодействия будет являться снижение перегрева до уровня $0,05(\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}) + \Delta T_{\min}$. Графически это проиллюстрировано на рис. 6. Значение расстояния, соответствующее уровню 0,05, обозначим как $t_{1,0,05}$. Итак, задача сводится к определению $t_{1,0,05}$ из (10) с подстановкой $0,05(\Delta T_{\max} - \Delta T_{\min}) + \Delta T_{\min}$ вместо $\Delta T_{\text{п}}$. Решив шесть алгебраических уравнений для шести слоев, получим результаты, приведенные в табл. 3 [6].

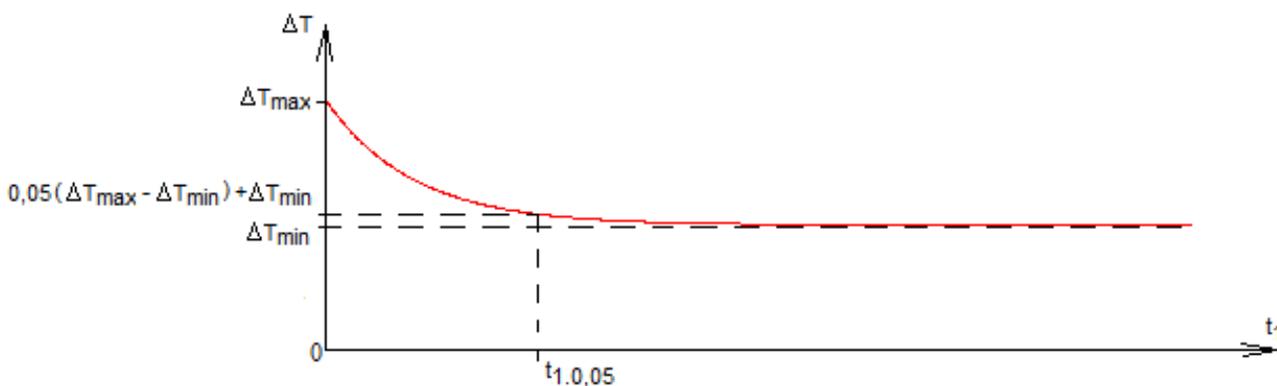


Рис. 6. Определение $t_{1,0,05}$

Таблица 3

Значения $t_{1,0,05}$ и $H_{\text{Э}}$

Слой	2	3	4	5	6	7
$H_{\text{Э}}, \text{мм}$	0,486	0,804	0,91	1,228	1,334	1,652
$t_{1,0,05}, \text{мм}$	3,01	3,446	3,511	3,688	3,778	3,665

В табл. 3 $H_{\text{Э}}$ – эквивалентная толщина пакета печатной платы. Как видно из работы [2], слои материалов в пакете печатной платы могут иметь разные теплофизические свойства. Эквивалентная толщина пакета – величина, приведенная к единому коэффициенту теплопроводности. Предположим, что i -й слой изоляционного материала толщиной h_i имеет коэффициент теплопроводности λ_i . Этот слой будет иметь тепловое сопротивление, такое же, как некоторый эквивалентный слой с толщиной $h_{i,\text{Э}}$ и коэффициентом теплопроводности $\lambda_{i,\text{Э}}$, если выполняется условие

$$h_{i,\text{Э}} = \frac{\lambda_{i,\text{Э}}}{\lambda_i} h_i. \tag{11}$$

Тогда эквивалентную толщину пакета можно найти по формуле

$$H_{\text{Э}} = \sum_{i=1}^n h_{i,\text{Э}}, \tag{12}$$

где n – общее количество слоев в пакете. В табл. 3 значения приведены к $\lambda_{i,\text{Э}} = 0,3 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

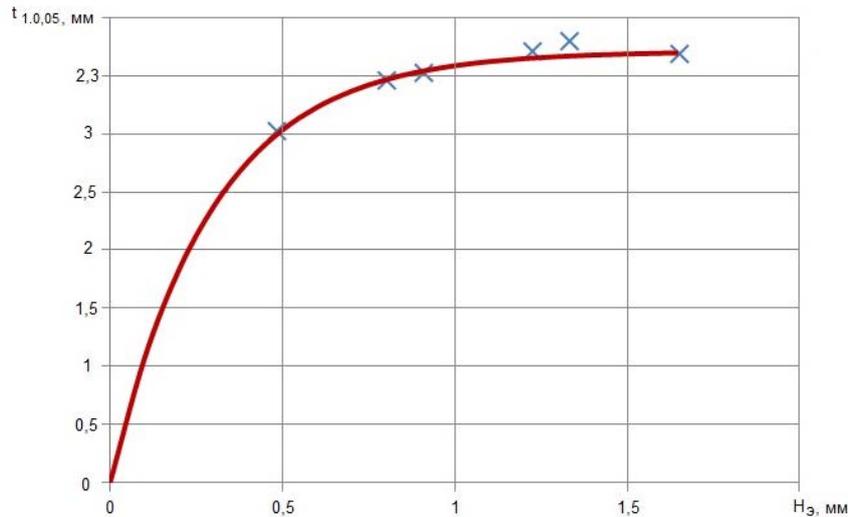


Рис. 7. Зависимость $t_{1,0,05}$ от $H_{Э}$

Подход, связанный с заменой фактической толщины на эквивалентную, позволит отойти от привязки к конкретным схемам расположения слоев, но вносит некоторые погрешности в вычисления. Это связано с тем, что граница раздела сред не является изотермической. График зависимости $t_{1,0,05}$ от $H_{Э}$ представлен на рис. 7. Зависимость аппроксимирована следующим выражением:

$$t_{1,0,05} = 3,710 \cdot (1 - e^{-3,409 \cdot H_{Э}}). \quad (13)$$

В формуле (13) все размеры в мм.

Из рисунка видно, что с ростом $H_{Э}$ увеличивается $t_{1,0,05}$, несмотря на то, что общая толщина печатной платы остается неизменной. Это можно объяснить тем, что наибольший вклад в отвод тепла вносят слои между ПП и основанием. Там меньше тепловое сопротивление. При полном соприкосновении ПП с основанием $H_{Э} = 0$ (предельный случай, которого на практике быть не может) перегревы будут равны нулю при любом t_1 , даже если $t_1 = 0$. Таким образом, при $H_{Э} = 0$ и $t_{1,0,05}$ будет равно нулю. Поэтому график начинается из нуля. Следует отметить, что график, представленный на рис. 7, не справедлив для внешнего ПП. С увеличением $H_{Э}$ до значения равного полной эквивалентной толщины существенно изменится $t_{1,0,05}$. Это связано с тем, что слои над ПП хоть и в меньшей степени, но влияют на перегрев. Поэтому область определения графика лежит в интервале от 0 до 1,652 мм. Полученный график (рис. 7) может помочь на практике оценить влияние соседних ПП при проектировании платы [7].

Заключение

Проводящий рисунок платы весьма сложен. Между собой могут взаимодействовать и ПП, расположенные на разных слоях и идущие под углом относительно друг друга. Произведено моделирование теплового процесса, произведен теоретический расчет и построены графики, которые помогут при практическом проектировании печатной платы.

Список литературы

1. Муравьев Ю. Особенности проектирования и производства печатных плат на металлическом основании // Производство электроники: Технология, оборудования, материалы. 2010. № 2. С. 35–38.
2. Костин А. В. Уточнение методики выбора ширины печатных проводников печатных плат на металлическом основании, работающих в условиях отсутствия конвекции // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2021. Т. 24, № 3. С. 80–91.
3. Костин А. В. Анализ влияния излучения на температуру печатных проводников печатных плат на металлическом основании для приборов космических аппаратов // Проектирование и технология электронных средств. 2021. № 4. С. 3–9.
4. Фридляндер И. Н., Сенаторова О. Г., Осинцев О. Е. [и др.]. Машиностроение. Энциклопедия. Цветные металлы и сплавы. Композиционные металлические материалы. Т. II-3 / под общ. ред. И. Н. Фридляндера. М. : Машиностроение, 2001. 880 с.
5. Дутьнев Г. Н., Семяшкин Э. М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. Л. : Энергия, 1968. 360 с.

6. Данилова Е. А., Кочегаров И. И., Трусов В. А. Модели технологических дефектов проводящего рисунка печатных плат // Надежность и качество сложных систем. 2017. № 2. С. 68–76. doi: 10.21685/2307-4205-2017-2-10
7. Гриднев В. Н., Миронова Ж. А., Шахнов В. А. Обеспечение качества компоновки монтажных контактных площадок высокоплотной ктационной платы // Надежность и качество сложных систем. 2014. № 4. С. 19–25.

References

1. Murav'ev Yu. Features of design and production of printed circuit boards on a metal base. *Proizvodstvo elektroniki: Tekhnologiya, oborudovaniya, materialy = Production of electronics: Technology, equipment, materials*. 2010;(2): 35–38. (In Russ.)
2. Kostin A.V. Clarification of the methodology for choosing the width of printed circuit board conductors on a metal base operating in the absence of convection. *Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy = Physics of wave processes and radio engineering systems*. 2021;24(3):80–91. (In Russ.)
3. Kostin A.V. Analysis of the effect of radiation on the temperature of printed circuit board conductors on a metal base for spacecraft instruments. *Proektirovanie i tekhnologiya elektronnykh sredstv = Design and technology of electronic means*. 2021;(4):3–9. (In Russ.)
4. Fridlyander I.N., Senatorova O.G., Osintsev O.E. et al. *Mashinostroenie. Entsiklopediya. Tsvetnye metally i splavy. Kompozitsionnye metallicheskie materialy. T. II-3 = Mechanical engineering. Encyclopedia. Non-ferrous metals and alloys. Composite metal materials. Vol. II-3*. Moscow: Mashinostroenie, 2001:880. (In Russ.)
5. Dul'nev G.N., Semyashkin E.M. *Teplobmen v radioelektronnykh apparatakh = Heat transfer in radio-electronic devices*. Leningrad: Energiya, 1968:360. (In Russ.)
6. Danilova E.A., Kochegarov I.I., Trusov V.A. Models of technological defects in the conductive pattern of printed circuit boards. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2017;(2): 68–76. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2017-2-10
7. Gridnev V.N., Mironova Zh.A., Shakhnov V.A. Ensuring the quality of the layout of mounting contact pads of a high-density CT board. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems*. 2014;(4):19–25. (In Russ.)

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Владимирович Костин

кандидат технических наук,
старший преподаватель кафедры конструирования
и технологии электронных систем и устройств,
Самарский национальный исследовательский
университет имени академика С. П. Королева
(Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34)
E-mail: electrodynamics27@yandex.ru

Aleksey V. Kostin

Candidate of technical sciences,
senior lecturer of the sub-department of design
and technology of electronic systems and devices,
Samara National Research University
named after Academician S.P. Korolev
(34 Moskovskoe highway, Samara, Russia)

Дмитрий Сергеевич Богданов

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

Dmitriy S. Bogdanov

Postgraduate student,
Samara National Research University
named after Academician S.P. Korolev
(34 Moskovskoe highway, Samara, Russia)

Игорь Сергеевич Бобров

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

Igor S. Bobrov

Postgraduate student,
Samara National Research University
named after Academician S.P. Korolev
(34 Moskovskoe highway, Samara, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /

The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию / Received 15.05.2023

Поступила после рецензирования / Revised 13.06.2023

Принята к публикации / Accepted 17.07.2023

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ И КАЧЕСТВА СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTIC METHODS FOR ENSURING RELIABILITY AND QUALITY OF COMPLEX SYSTEMS

УДК 004.896

doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-12

ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ВИРТУАЛЬНЫХ ИСПЫТАНИЙ АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

М. Е. Данилин¹, А. В. Заяра², В. Д. Федулов³

^{1,2,3} Военный инновационный технополис «ЭРА», Анапа, Россия

^{1,2} zaw1966@mail.ru, ³ vdf21@yandex.ru

Аннотация. *Актуальность и цели.* Алгоритмы искусственного интеллекта для систем управления робототехнических комплексов также являются продукцией, качество которой необходимо подтверждать результатами испытаний. *Материалы и методы.* Разработаны предложения в методику проведения виртуальных испытаний алгоритмов распознавания реперных маркеров *ArUco*, которые широко используются в робототехнике. *Результаты и выводы.* Определены показатели надежности, по которым предлагается оценивать качество технологий искусственного интеллекта.

Ключевые слова: робототехнические комплексы, искусственный интеллект, алгоритм распознавания, виртуальные испытания

Для цитирования: Данилин М. Е., Заяра А. В., Федулов В. Д. Предложения по организации виртуальных испытаний алгоритмов распознавания объектов в системах управления мобильных робототехнических комплексов // Надежность и качество сложных систем. 2023. № 3. С. 100–106. doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-12

PROPOSALS FOR ORGANIZING VIRTUAL TESTS OF OBJECT RECOGNITION ALGORITHMS IN CONTROL SYSTEMS OF MOBILE ROBOTIC COMPLEXES

M.E. Danilin¹, A.V. Zayara², V.D. Fedulov³

^{1,2,3} Military innovative technopolis "ERA", Anapa, Russia

^{1,2} zaw1966@mail.ru, ³ vdf21@yandex.ru

Abstract. *Background.* Artificial intelligence algorithms for control systems of robotic complexes are also products, the quality of which must be confirmed by test results. *Materials and methods.* Proposals have been developed for the methodology for conducting virtual tests of ArUco fiducial marker recognition algorithms, which are widely used in robotics. *Results and conclusions.* Reliability indicators are determined, according to which it is proposed to evaluate the quality of artificial intelligence technologies.

Keywords: robotic systems, artificial intelligence, recognition algorithm, virtual tests

For citation: Danilin M.E., Zayara A.V., Fedulov V.D. Proposals for organizing virtual tests of object recognition algorithms in control systems of mobile robotic complexes. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh sistem = Reliability and quality of complex systems*. 2023;(3):100–106. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2023-3-12

На сегодняшний день мобильные робототехнические комплексы (РТК) применяются практически во всех областях человеческой деятельности, включая производство, логистику, сельское хозяйство, строительство и т.д. Если при работе в помещении с неизменной внутренней конфигурацией, например, внутри склада, задача автономной доставки грузов решена, то проблема управления комплексом при перемещении по пересеченной местности в незнакомых условиях остается открытой. По этой причине производители не прекращают работы по интеграции в систему управления мобильных РТК таких технологий искусственного интеллекта (ИИ), как «Следуй за мной», визуальная навигация и голосовое управление. Подтвердить качество этих технологий возможно только путем проведения испытаний. На основании этого разработка предложений в проекты типовых программ испытаний мобильных РТК в части проверки требований, реализованных с помощью технологий ИИ, является актуальным научным направлением.

По результатам анализа информации официального сайта Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии можно сделать вывод о том, что разработкой методического аппарата, регламентирующего содержание испытаний РТК, должен заниматься технический комитет по стандартизации ТК 164 «Робототехника». Несмотря на то, что в составе нового комплекса стандартов Р60 этого комитета из 49 документов 26 имеют в наименовании слово «испытания», отдельные предложения по организации тестирования именно технологий ИИ возможно найти только в ГОСТ¹. Они применяются:

- для оценки погрешности отработки комплексом пространственного расположения;
- для автономного обнаружения и обхода препятствий.

Все остальные методики применяются в основном для подтверждения ходовых характеристик мобильных роботов.

Вместе с этим другой технический комитет ТК 141 «Искусственный интеллект» рекомендует методические инструменты для оценки качества систем ИИ, которые применяются в транспортной отрасли. В целях повышения доверия к технологиям ИИ национальный стандарт устанавливает состав функциональных подсистем высокоавтоматизированного транспортного средства². Под функциональной подсистемой понимается программный модуль транспортного средства, в котором используются частные алгоритмы ИИ для решения конкретных практических задач. Подобный структурный подход можно применить к системе управления РТК. Если сравнить структуры подсистемы интерпретации входных данных в транспортном средстве и технологию ИИ «Следуй за мной» в РТК, то алгоритму распознавания дорожных знаков можно сопоставить алгоритм распознавания реперных маркеров *ArUco*. Эти алгоритмы широко используются в робототехнике для позиционирования роботов, и реализуются с помощью библиотеки *OpenCV* [1, 2].

Планируется, что в составе технологии ИИ «Следуй за мной» алгоритм распознавания *ArUco* метки будет участвовать в обеспечении автономного движения мобильного РТК следующим образом. Маркер располагается на жилете испытателя, выступающего в роли ведущего. Алгоритм должен его распознать и определить положение (рис. 1).

Для комплексной оценки качества функционирования алгоритма предлагается применить следующие типы испытаний с учетом рекомендаций национального стандарта³:

- виртуальные;
- испытания на полигоне, под которым понимается территория (помещение) и испытательные сооружения, оснащенные средствами испытаний⁴;
- испытания на пересеченной местности.

¹ ГОСТ Р 60.6.3.15–2021. Роботы и робототехнические устройства. Рабочие характеристики и соответствующие методы испытаний сервисных мобильных роботов. Навигация.

² ГОСТ Р 70250–2022. Системы искусственного интеллекта на автомобильном транспорте. Варианты использования и состав функциональных подсистем искусственного интеллекта.

³ ГОСТ Р 70250–2022. Системы искусственного интеллекта на автомобильном транспорте. Варианты использования и состав функциональных подсистем искусственного интеллекта.

⁴ ГОСТ 16504–81. Система государственных испытаний продукции. Испытания и контроль качества продукции. Основные термины и определения.



Рис. 1. Движение мобильного РТК за оператором с *ArUco* маркером

Процедуру аудита и оценки, а также мониторинг, которые стандарт включает в обязательный перечень испытаний, рекомендуется признать нецелесообразными для проведения по следующим причинам. Результаты аудита зависят от субъективности экспертов и не гарантируют достоверной оценки безопасности и функциональности, а процедура мониторинга относится уже к стадии эксплуатации.

Таким образом, комплекс обязательных мероприятий по подтверждению качества алгоритмов ИИ должен начинаться с этапа виртуальных испытаний, которые представляют собой компьютерное моделирование процесса управления движением РТК. Для обеспечения их практической реализации необходимо:

- создать среду симуляции, которая идентична обстановке, в которой предполагается применение комплекса;
- провести моделирование движения РТК по пересеченной местности, по возможности изменяя погодные и дорожные условия.

Этап виртуальных испытаний на основе имитационных моделей играет важную роль в обеспечении комплексной оценки систем ИИ. Этот вид тестирования можно использовать для проверки конкретного алгоритма ИИ в широком диапазоне сценариев полевых ситуаций при различных условиях применения с минимальными затратами. Цель виртуализации испытаний заключается в том, чтобы с достаточной степенью адекватности воспроизвести функционирование мобильного комплекса, а также имитировать воздействие на него окружающей среды и других физических объектов в процессе применения по назначению.

В ходе виртуальных испытаний могут использоваться различные типы инструментальных средств для оценки соответствия алгоритмов в составе системы управления требованиям функциональности в широком диапазоне ландшафтных театров, включая те из них, на которых организовать проведение полигонных испытаний весьма сложно.

В зависимости от состава оборудования, которое задействуется для создания реальных условий функционирования системы ИИ, применяются различные подходы, сущность которых поясняется схемой на рис. 2.

Для организации виртуальных испытаний алгоритма распознавания *ArUco* метки наиболее адекватным видится подход проведения имитационного моделирования полностью на компьютере. Такую модель можно «проиграть» во времени, как для одного испытания, так и для нескольких. При этом случайным характером можно изменять условия моделирования. По результатам можно получить адекватные показатели качества функционирования алгоритмов.



Рис. 2. Схема, поясняющая сущность организации имитационных и виртуальных испытаний

Экспериментирование с моделью называется имитацией [3], для ее реализации необходимо иметь:

- персональный компьютер с техническими характеристиками, полностью удовлетворяющими требованиям к аппаратному обеспечению алгоритмов в составе системы ИИ, и для запуска испытательной системы, копирующей среду функционирования алгоритма распознавания *ArUco* метки;
- программное обеспечение самого алгоритма с интерфейсом, позволяющим воздействовать на него с помощью тестирующей выборки и оценивать результаты обработки синтетического видео алгоритмом;
- видеоролик, представляющий собой имитационную модель движения *ArUco* метки на спине оператора в различных вариантах условий окружающей среды.

Тестирующее видео создавалось с использованием программы на языке *Python* в редакторе исходного кода *Visual Studio Code* на основе анализа изменения формы и искажения рисунка реперного маркера. С целью улучшения репрезентативности тестирующей выборки использовались приемы, перечисленные в табл. 1. Параметры, характеризующие перемещение метки, указаны как в абсолютных величинах, с учетом того, как бы перемещение проецировалось в поле зрения камеры, так и в пикселях (воспроизведение на экране монитора).

Модель воспроизводила перемещение *ArUco* метки в поле зрения фронтальной камеры РТК. Имитировалось движение маркера на спине человека, который движется по пересеченной местности. В процессе моделирования были воспроизведены условия удаления РТК от ведущего приблизительно на 3,5 м. Продольные перемещения в поле зрения камеры, соответствующие изменению направления идущим оператором, воспроизводились движением маркера по синусоиде. Дополнительные колебания с меньшей амплитудой воспроизводили естественную походку человека. Возможные искажения метки при наклонах и поворотах корпуса ведущего имитировались последовательным вращением *ArUco* маркера вокруг трех осей: абсцисс, ординат и аппликата. Предельные значения углов поворота указаны в табл. 1. Также для повышения обобщающей способности модели были применены такие методы аугментации, как размытие маркера и периодическая смена фона окружающей среды.

Тестирующий видеоролик (рис. 3) в качестве входного воздействия был загружен в качестве исходных данных для обработки алгоритмом распознавания. Имитационное моделирование проводилось на ЭВМ с центральным процессором *Intel Core i7-10510U* 2,3 ГГц, графическим процессором *Intel UHD* и оперативной памятью 16 Гб.

Таблица 1

Характеристики имитационных движений человека

Декомпозиция реального движения метки на спине оператора и условий окружающей среды	Имитация движения оператора (окружающих условий)	Величина перемещения	
		в абсолютных величинах	в относительных, пиксели
Перемещение в горизонтальной плоскости	Движение по кочкам	$A_{\max} = 0,2 \text{ м}$ $V_6 \approx 0,2 \text{ м/с}$	$A_{\max} = 75 \text{ пкс}$ $V_6 \approx 0,2 \text{ м/с}$
Перемещение в вертикальной плоскости	Походка человека	$A_{\text{п max}} = 0,05 \text{ м}$	$A_{\text{п max}} = 18 \text{ пкс}$
		$T \approx 1,3 \text{ с}$	
Перемещение в радиальном направлении	Удаление (приближение)	$D = \pm 1 \text{ м}$	$D = \pm 20 \text{ пкс}$
Повороты метки относительно ее центра (оси OX)	Раскачивание корпуса человека влево-вправо	$\angle \alpha = 0 \pm 5^\circ$	–
Повороты метки относительно горизонтальной оси, проходящей через ее центр (оси OY)	Наклоны корпуса вперед и отклонения назад	$\angle \beta = 0 \pm 20^\circ$	–
Повороты метки относительно вертикальной оси, проходящей через ее центр (оси OZ)	Боковые повороты корпуса	$\angle \gamma = 0 \pm 50^\circ$	–
Изменение времени суток (затемнение), погодные условия (туман), запыление	Размытие	–	–



Рис. 3. Скриншот тестирующего видео с численными результатами виртуальных испытаний

Основным критерием для оценки качества алгоритма распознавания *ArUco* метки выбирается такая существенная характеристика, как надежность, которая характеризует свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения [4]¹. Прежде всего, основной функцией алгоритма является распознавание *ArUco* маркера, пока тот находится в поле зрения камеры РТК. По результатам проведения виртуальных испытаний, проведенных в течение 6 мин 25 с (385 с) с учетом существенных факторов, влияющих на эксплуатацию комплекса, оценивались два показателя:

- максимальная продолжительность непрерывного периода, в течение которого метка не распознавалась (4,0 с);
- суммарная продолжительность времени, в течение которого метка не распознавалась (62,04 с).

При условии отсутствия в поле камеры РТК оператора априори комплекс должен остановиться, учитывая обстоятельство, что средняя скорость пешехода по пресеченной местности 4,5 км/ч, что составляет $V_{\text{ср}} \approx 1,25 \text{ м/с}$. Таким образом, в случае исчезновения ведущего из поля зрения робота,

¹ ГОСТ Р 59276–2020. Системы искусственного интеллекта. Способы обеспечения доверия. Общие положения.

дистанция между ним и человеком может увеличиться на отрезок длиной до 5 м, что вполне допустимо. Относительная общая продолжительность времени, когда система управления комплекса «не видела» *ArUco* метку, составляет 16,1 % [5, 6].

Разумеется, что для подтверждения доверия к алгоритму ИИ проведения одних виртуальных тестирований недостаточно. Тем не менее положительной стороной виртуальных испытаний являются масштабируемость, рентабельность, безопасность и эффективность по сравнению с полигонным или реальным испытанием, что позволяет создавать широкий спектр сценариев использования по назначению и прогнозировать численные оценки характеристик технологий ИИ.

Список литературы

1. Локализация по Aruco маркерам. URL: <https://habr.com/ru/articles/482220> (дата обращения 15.06.2023).
2. OpenCV – открытая библиотека компьютерного зрения. URL: https://docs.opencv.org/4.x/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html (дата обращения: 15.06.2023).
3. Норкин И. И. Системы эмуляции и симуляции сети // Инжиниринг и технологии. 2018. № 3. С. 1–3.
4. Иванов С. В., Зайченко А. В., Хорольский Е. М., Колесников А. А. Методика оценки состояния робототехнических комплексов двойного назначения на основе применения трехуровневой архитектуры СУБД // Надежность и качество сложных систем. 2022. № 1. С. 46–54. doi: 10.21685/2307-4205-2022-1-6
5. Березнев В. А. Система безаварийного управления группой роботов // Надежность и качество сложных систем. 2020. № 4. С. 73–78. doi: 10.21685/2307-4205-2020-4-8
6. Дивеев А. И., Шмалько Е. Ю. Метод синтезированного оптимального управления для группы роботов // Надежность и качество сложных систем. 2018. № 4. С. 40–47. doi: 10.21685/2307-4205-2018-4-4

References

1. *Lokalizatsiya po Aruco markeram = Localization by Aruco markers.* (In Russ.). Available at: <https://habr.com/ru/articles/482220> (accessed 15.06.2023).
2. *OpenCV – otkrytaya biblioteka komp'yuternogo zreniya = OpenCV is an open library of computer vision.* (In Russ.). Available at: https://docs.opencv.org/4.x/d5/dae/tutorial_aruco_detection.html (accessed 15.06.2023).
3. Norkin I.I. Network emulation and simulation systems. *Inzhiniring i tekhnologii = Engineering and technology.* 2018;(3):1–3. (In Russ.)
4. Ivanov S.V., Zaychenko A.V., Khorol'skiy E.M., Kolesnikov A.A. Methodology for assessing the state of dual-purpose robotics complexes based on the use of a three-level DBMS architecture. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2022;(1):46–54. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2022-1-6
5. Bereznev V.A. System of trouble-free control of a group of robots. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2020;(4):73–78. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2020-4-8
6. Diveev A.I., Shmal'ko E.Yu. Method of synthesized optimal control for a group of robots. *Nadezhnost' i kachestvo slozhnykh system = Reliability and quality of complex systems.* 2018;(4):40–47. (In Russ.). doi: 10.21685/2307-4205-2018-4-4

Информация об авторах / Information about the authors

Максим Евгеньевич Данилин

научный сотрудник,
Военный инновационный технополис «ЭРА»
(Россия, г. Анапа, Пионерский пр-т, 41)
E-mail: zaw1966@mail.ru

Андрей Владимирович Заяра

кандидат технических наук, старший научный
сотрудник научно-исследовательского отдела,
Военный инновационный технополис «ЭРА»
(Россия, г. Анапа, Пионерский пр-т, 41)
E-mail: zaw1966@mail.ru

Вячеслав Дмитриевич Федулов

старший оператор,
Военный инновационный технополис «ЭРА»
(Россия, г. Анапа, Пионерский пр-т, 41)
E-mail: vdf21@yandex.ru

Maksim E. Danilin

Researcher,
Military innovative technopolis "ERA"
(41 Pionersky avenue, Anapa, Russia)

Andrey V. Zayara

Candidate of technical sciences,
senior research fellow of the research department,
Military innovative technopolis "ERA"
(41 Pionersky avenue, Anapa, Russia)

Vyacheslav D. Fedulov

Senior operator,
Military innovative technopolis "ERA"
(41 Pionersky avenue, Anapa, Russia)

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

Поступила в редакцию/Received 14.06.2023

Поступила после рецензирования/Revised 10.07.2023

Принята к публикации/Accepted 11.08.2023